



UNIVERSIDADE FEDERAL DE MINAS GERAIS
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM
ENGENHARIA MECÂNICA

**“PERFIS PULTRUDADOS DE PLÁSTICO REFORÇADO COM
FIBRA DE VIDRO APLICADOS À ESTRUTURA DE UM BANCO
DE CAPACITORES DE SUBESTAÇÃO DE ENERGIA
ELÉTRICA”**

MARCOS WILLIAN DE SOUZA

Belo Horizonte/MG, Julho de 2007.

MARCOS WILLIAN DE SOUZA

**“PERFIS PULTRUDADOS DE PLÁSTICO REFORÇADO COM
FIBRA DE VIDRO APLICADOS À ESTRUTURA DE UM BANCO
DE CAPACITORES DE SUBESTAÇÃO DE ENERGIA
ELÉTRICA”**

Dissertação apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia Mecânica da Universidade Federal de Minas Gerais, como requisito parcial à obtenção do título de Mestre em Engenharia Mecânica

Área de Concentração: Processos de Fabricação

Orientador: Prof. Carlos Alberto Cimini Júnior (UFMG)

Belo Horizonte/MG

Escola de Engenharia da UFMG

2007

AGRADECIMENTOS

Agradeço em primeiríssimo lugar ao meu Deus maravilhoso, criador de todas as coisas, pois é Ele quem me capacita e me dá forças para lutar pelos meus sonhos. O Senhor Deus é que me levantou nos momentos em que pensei em desistir, momentos estes que não encontrava mais forças no mundo natural, então Ele me mostrava na Sua Palavra: **“Tudo posso naquele que me fortalece.” (Fp 4.13); “... Ele é o meu refúgio e a minha fortaleza, o meu Deus, em quem confio.” (Sl 91.2); “... Deus resiste aos soberbos, mas dá aos humildes a honra da vitória.” (Tiago 4.6).**

Dedico este trabalho à minha amada esposa **LEIDE**, pois sempre compreendeu perfeitamente meus momentos de ausência, quando ficava debruçado diante dos estudos e a deixava em 2º plano. Esse trabalho foi possível principalmente pelo fato de ter uma mulher sábia e virtuosa, pois sempre esteve firme ao meu lado a todo tempo, principalmente nos momentos mais difíceis, enfim, ela foi sempre minha fiel ajudadora.

Sou muito grato aos meus pais José Camilo e Zelita, que foram os principais responsáveis pela formação do meu caráter, me ensinaram a ser uma pessoa de boa índole, mantendo sempre minha integridade e retidão independentemente das circunstâncias. Sou grato principalmente pela ousadia da minha mãe, pois foi ela a grande incentivadora dos estudos, mesmo sendo extremamente humildes, ela nos mostrava que poderíamos vencer a escassez de recursos estudando com dedicação e entusiasmo, para no futuro fazer a diferença.

Agradeço também ao meu Orientador Prof. Cimini, que confiou plenamente na minha capacidade. Sou grato também ao Prof. Cláudio Barros do CEA, com quem tive o 1º contato ao chegar na UFMG após ter passado pelo ITA, pois ele me deu a mais profunda palavra de motivação.

E por último, é importantíssimo manifestar minha profunda gratidão aos meus amigos da INFRAERO, Carlos Henrique, Israel e Ledenir, pois cada um deles me ajudou grandemente de forma incondicional.

RESUMO

Neste trabalho, uma estrutura treliçada de um banco de capacitores foi projetada usando perfis pultrudados de plástico reforçado com fibra de vidro (PRFV) como forma alternativa. Um modelo de elementos finitos foi desenvolvido para simular os comportamentos estático e de estabilidade da estrutura. As propriedades do material foram avaliadas por um programa de ensaios de caracterização. Um protótipo da estrutura foi construído, instrumentado e testado para validação do modelo. Adicionalmente, três casos críticos de cargas foram simulados. Os resultados apresentaram margens de segurança elevadas para as análises estáticas. Entretanto, as margens de segurança da análise de estabilidade global para uma das condições de contorno foram baixas, indicando que a estrutura deveria sofrer reforços em alguns pontos. No geral, os resultados justificam o uso de perfis pultrudados de PRFV como material alternativo no projeto de estruturas treliçadas de bancos de capacitores.

Palavras-chave – *PRFV, perfis pultrudados, banco de capacitores, subestações de energia elétrica.*

ABSTRACT

In this work, an alternative capacitor bank framed structure was designed using glass fiber reinforced polymer (GFRP) pultruded bars. A finite element model was developed to simulate the structure static behavior and stability. Material properties were evaluated by a characterization test program. A prototype of the structure was built, instrumented and tested in order to validate the model. Additional three critical load cases were simulated. Results of these simulations showed large safety margins for static analysis. However, safety margins for global stability were marginal, indicating that the structure should be reinforced in some points. In general, results support the use of GFRP as an alternative material in the design of capacitor bank framed structures.

Keywords: *GFRP, pultruded bars, capacitor bank, electrical energy substations.*

SUMÁRIO

Nomenclatura	x
Lista de Figuras	xiv
Lista de Tabelas	xix
1) Introdução	1
1.1) Considerações Iniciais	1
1.2) Conteúdo do Trabalho	1
2) Objetivo	3
3) Revisão Bibliográfica	4
3.1) Introdução	4
3.2) Aspectos Gerais Sobre as Linhas Aéreas de Transmissão de Energia	4
3.3) Materiais Convencionais Aplicados em Suportes de LT's	8
3.4) Materiais Compostos	9
3.4.1) Introdução	9
3.4.2) Processo de fabricação dos CPRF's: a pultrusão	15
3.4.3) Propriedades gerais dos CPRF's e as recentes aplicações de compósitos pultrudados na engenharia estrutural	17
3.5) Elementos Básicos para Projetos das Linhas Aéreas de Transmissão	25

3.5.1)	Considerações e normas utilizadas em dimensionamento de suportes de LT's e LS's	25
3.5.1.1)	Equações básicas de esforços horizontal para dimensionamento de componentes de subestações	26
3.5.1.1.1)	Velocidade do vento de projeto (Vp)	27
3.5.1.1.2)	Pressão do vento	31
3.5.1.1.3)	Esforços de vento atuante em acessórios	32
3.5.1.1.4)	Esforços de vento atuante nos suportes	32
3.5.1.1.5)	Esforço nos barramentos devido à atuação do vento	34
3.5.1.1.6)	Esforço nos barramentos devido ao fenômeno de curto-circuito	34
3.6)	Critérios de Análise de Estruturas: Resistência Mecânica e Estabilidade	39
3.6.1)	Resistência mecânica	39
3.6.2)	Estabilidade	41
3.7)	Método dos Elementos Finitos (MEF) Aplicado à Análise Estrutural	44
3.7.1)	Considerações iniciais	44
3.7.2)	Plataforma computacional ANSYS e a análise estrutural	45
4)	Metodologia	47
4.1)	Introdução	47
4.2)	A Estrutura de Estudo: Banco de Capacitores ou Pórtico A12	47
4.3)	Caracterização do Material Pultrudado	48
4.4)	Cálculo das Cargas Atuantes no Banco de Capacitores	50
4.5)	Modelagem do Banco de Capacitores em Elementos Finitos	51
4.5.1)	Introdução	51

4.5.2)	Modelo para validação do ensaio	54
4.5.3)	Aplicação das cargas e momentos no MEF de validação do ensaio	54
4.5.4)	Modelos para estudo dos casos de curto-circuito	55
4.5.5)	Aplicação das cargas e momentos no MEF para os três casos de curto-circuito	56
4.6)	Ensaio para a validação do Modelo de Elementos Finitos do Banco de Capacitores	61
4.6.1)	Montagem da Estrutura de Validação em material pultrudado	61
5)	Resultados e Discussão	66
5.1)	Resultados Obtidos para a Caracterização do Material Pultrudado	66
5.2)	Análises Estática e Dinâmica para os MEF	85
5.2.1)	Modelo de Validação do Ensaio	85
5.2.2)	Análise do Ensaio Real x MEF	86
5.2.3)	Análise estática dos modelos de curto-circuito	93
5.2.4)	Análise de estabilidade para os modelos de curto-circuito	95
6)	Conclusões	104
	Referências Bibliográficas	105
	Apêndice A: Projeto original do Banco de Capacitores (CEMIG)	110
	Apêndice B: Memória de Cálculos	111

B.1) Cálculo de Cargas e Momentos	111
B.1.1) Considerações iniciais	111
B.1.2) Determinação da densidade	112
B.1.3) Cálculo de cargas e momentos nos acessórios	113
B.1.4) Cálculo de cargas no suporte	120
B.1.5) Cálculo de cargas e momentos nos barramentos	122
Apêndice C: Banco de Capacitores de Material Pultrudado	131

NOMENCLATURA

V_H	velocidade de vento para alturas específicas (diferente de 10 m)
V_{10}	velocidade básica do vento para altura de 10 m
V_p	velocidade do vento de projeto
V_b	velocidade básica do vento
H	altura de obstáculo
n	coeficiente definido conforme categoria do terreno (A, B, C ou D) do período de integração
t	período de integração
T	período de retorno
K_r	coeficiente que representa rugosidade de um terreno
K_d	coeficiente que representa a relação entre os valores médios de vento a 10 metros de altura do solo, para diferentes períodos de integração e rugosidade do terreno
V_T	valor da velocidade básica corrigida para período de retorno diferente de 50 anos
q_o	pressão dinâmica de referência
t_c	temperatura coincidente
ALT	altura média de implantação da linha
S_i	área da cadeia dos isoladores ou acessórios projetada sobre um plano vertical
S_{T1}, S_{T2}	área líquida total de uma face projetada ortogonalmente sobre o plano vertical situado na direção das faces 1 e 2, respectivamente

C_{xi}	coeficiente de arrasto
C_{XT1}, C_{XT2}	coeficientes de arrasto próprios das faces 1 e 2 para um vento perpendicular a cada face
A_i	esforço de vento atuante no isolador ou acessório considerado
A_t	esforço de vento atuante nos suportes
A_t	esforço de vento atuante nos barramentos
C_{XC}	<i>coeficientes de arrasto próprio para um vento perpendicular ao barramento</i>
P_V	força no barramento devido à atuação do vento em sua extensão
D	Diâmetro
L	comprimento
F	força
I	corrente elétrica
d	distância
P_C	força de curto circuito
CS	coeficiente de segurança
MS	margem de segurança
P_{cr}	carga crítica de flambagem
I	menor momento de inércia da seção transversal
E	módulo de elasticidade
L	comprimento de uma barra

L_e	comprimento de flambagem de uma barra
R	raio de giração mínimo da seção transversal
S	área da seção transversal
K	fator de comprimento efetivo de uma barra
MS_f	margem de segurança em relação a flambagem
E_1	módulo de elasticidade do material na direção longitudinal
E_2	módulo de elasticidade do material na direção transversal
R	resistência
R_i	resistência inicial
S_a	sensibilidade do SG à deformação axial;
S_g	fator gauge
$PRFV$	Plástico Reforçado com Fibra de Vidro
ρ	massa específica do ar
θ	ângulo de incidência do vento
Φ	relação entre as áreas líquida e bruta que constituem os suportes
α	coeficiente de efetividade
μ_0	permeabilidade magnética no vácuo
σ_{ult}	tensão limite de resistência do material
σ_{adm}	tensão admissível do material
λ	auto-valor

σ_{cr}	tensão crítica de flambagem
σ_{atu}	tensão atuante na barra
$\Delta\sigma$	variação de carga em uma porção linear da curva de ensaio
$\Delta\varepsilon$	variação de deformação em uma porção linear da curva de ensaio
ν_{12}	coeficiente de Poisson do material na direção longitudinal
ν_{21}	coeficiente de Poisson do material na direção transversal
ε_2	deformação obtida pelo Strain Gauge transversal na porção linear da curva
ε_1	deformação obtida pelo Strain Gauge longitudinal na porção linear da curva
ΔR	variação de resistência
ε_a	deformação ao longo da direção axial do SG
ε_t	deformação ao longo da direção transversal do SG
λ_{ba}	auto-valor de barras bi-articuladas
λ_{be}	auto-valor de barras bi-engastadas

LISTA DE FIGURAS

Figura 3.1 – As formas mais comuns da fase dispersa de um material composto	10
Figura 3.2 – (a) Tecido de fibras de vidro, (b) Manta de fibras de vidro	13
Figura 3.3 – Aspecto geral de uma máquina pultrusora	16
Figura 3.4 – Perfis pultrudados típicos e com coloração	17
Figura 3.5 – (a) Ponte de perfis pultrudados, Dinamarca, (b) Aplicação de elementos pultrudados no passadiço de pontes na Virgínia	20
Figura 3.6 – Torres de transmissão de energia produzidas de material pultrudado, San Diego, Califórnia	21
Figura 3.7 – (a) Poste de concreto armado, (b) Cruzetas de madeira e aço, (c) instalação de poste de compósito pultrudado, (d) cruzeta de compósito pultrudado	22
Figura 3.8 – (a) Ponte montada, (b) Detalhe construtivo da treliça de pultrudados	23
Figura 3.9 – Detalhe de conexão utilizada em estruturas de material pultrudado	24
Figura 3.10 – Velocidade básica do vento no território brasileiro	27
Figura 3.11 – Relação entre as velocidades médias a 10 m de altura	30
Figura 3.12 – Médias das temperaturas mínimas diárias	31
Figura 3.13 – Coeficientes de arrasto para painéis de suportes treliçadas (índice de área exposta)	33
Figura 3.14 – Ação do vento sobre um tronco de suporte	34
Figura 3.15 - Representação da teoria da força magnética entre dois condutores	35
Figura 3.16 - Representação da teoria de força de curto-circuito para o caso 1	37

Figura 3.17 - Representação da teoria de força de curto-circuito para o caso 2	38
Figura 3.18 - Representação da teoria de força de curto circuito para o caso 3	39
Figura 3.19 – Comprimento de flambagem para várias situações de extremidade	43
Figura 4.1 – Modo de retirada do material pultrudado para a confecção de corpos de prova (Fibras Longitudinais)	48
Figura 4.2 – Modo de retirada do material pultrudado para a confecção de corpos de prova (Fibras Transversais)	49
Figura 4.3 – Corpo de prova de material pultrudado	49
Figura 4.4 – Máquina de Ensaio Marca INSTRON Laboratório do CDTN-UFMG	50
Figura 4.5 – (a) Perfil U, (b) Perfil L, (c) Perfil duplo L	51
Figura 4.6 – Elemento <i>BEAM 189-3D</i>	52
Figura 4.7 – Sistema de coordenadas local do Elemento de Viga	53
Figura 4.8 – Pontos de aplicação de cargas para a Estrutura de Validação	55
Figura 4.9 – (a) Áreas constituintes das faces do BC; (b) Pontos de aplicação da força de vento nas faces do BC	57
Figura 4.10 – Pontos de aplicação de cargas para o caso 1 de curto-circuito	58
Figura 4.11 – (a) Elevação do módulo superior da EV; (b) Fixação de um isolador entre os módulos	62
Figura 4.12 – (a) Vista frontal da EV; (b) Vista em perspectiva da EV	62
Figura 4.13 – (a) Sistema de elevação dos capacitores; (b) Configuração final da Estrutura de Validação montada com os capacitores	63
Figura 4.14 – Pontos de maior deformação para o modelo de validação do ensaio	64

Figura 4.15 – (a) Posicionamento do Strain Gauge; (b) Ligação de um Strain Gauges	64
Figura 4.16 – Esquema da montagem do ensaio da Estrutura de Validação	65
Figura 5.1 – CDP longitudinal após ensaio de tração	67
Figura 5.2 – CDP transversal após ensaio de tração	67
Figura 5.3 – Gráfico resultante do ensaio do corpo de prova 1L (SG2)	68
Figura 5.4 – Gráfico resultante do ensaio do corpo de prova 2L (SG2)	69
Figura 5.5 – Gráfico resultante do ensaio do corpo de prova 3L (SG2)	69
Figura 5.6 – Gráfico resultante do ensaio do corpo de prova 4L (SG2)	70
Figura 5.7 – Gráfico resultante do ensaio do corpo de prova 5L (SG2)	70
Figura 5.8 – Gráfico resultante do ensaio do corpo de prova 6L (SG2)	71
Figura 5.9 – Gráfico resultante do ensaio do corpo de prova 1T (SG2)	72
Figura 5.10 – Gráfico resultante do ensaio do corpo de prova 2T (SG2)	73
Figura 5.11 – Gráfico resultante do ensaio do corpo de prova 3T (SG2)	73
Figura 5.12 – Gráfico resultante do ensaio do corpo de prova 4T (SG2)	74
Figura 5.13 – Gráfico resultante do ensaio do corpo de prova 5T (SG2)	74
Figura 5.14 – Gráfico resultante do ensaio do corpo de prova 6T (SG2)	75
Figura 5.15 – Gráfico resultante do ensaio do corpo de prova 1L (SG1)	76
Figura 5.16 – Gráfico resultante do ensaio do corpo de prova 2L (SG1)	77
Figura 5.17 – Gráfico resultante do ensaio do corpo de prova 3L (SG1)	77
Figura 5.18 – Gráfico resultante do ensaio do corpo de prova 4L (SG1)	78

Figura 5.19 – Gráfico resultante do ensaio do corpo de prova 5L (SG1)	78
Figura 5.20 – Gráfico resultante do ensaio do corpo de prova 1T (SG1)	79
Figura 5.21 – Gráfico resultante do ensaio do corpo de prova 2T (SG1)	80
Figura 5.22 – Gráfico resultante do ensaio do corpo de prova 3T (SG1)	80
Figura 5.23 – Gráfico resultante do ensaio do corpo de prova 4T (SG1)	81
Figura 5.24 – Gráfico resultante do ensaio do corpo de prova 5T (SG1)	81
Figura 5.25 – Gráfico resultante do ensaio do corpo de prova 6T (SG1)	82
Figura 5.26 – Ensaio da Estrutura de Validação	86
Figura 5.27 – Campos de tensões longitudinais (x-local) (MPa) para carga obtida no ensaio (1509,27 N)	87
Figura 5.28 – Resultados para <i>Strain Gauge</i> 01	89
Figura 5.29 – Resultados para <i>Strain Gauge</i> 02	89
Figura 5.30 – Resultados para <i>Strain Gauge</i> 03	90
Figura 5.31 – Resultados para <i>Strain Gauge</i> 04	90
Figura 5.32 – Resultados para <i>Strain Gauge</i> 05	91
Figura 5.33 – Resultados para <i>Strain Gauge</i> 06	91
Figura 5.34 – Resultados para <i>Strain Gauge</i> 07	92
Figura 5.35 – Resultados para <i>Strain Gauge</i> 08	92
Figura 5.36 – Campos de tensões longitudinais (x-local) (MPa) para o caso 01	93
Figura 5.37 – Campos de tensões longitudinais (x-local) (MPa) para o caso 02	94

Figura 5.38 – Campos de tensões longitudinais (x-local) (MPa) para o caso 03	94
Figura 5.39 – Primeiro modo de flambagem para o caso 01	97
Figura 5.40 – Segundo modo de flambagem para o caso 01	98
Figura 5.41 – Terceiro modo de flambagem para o caso 01	98
Figura 5.42 – Primeiro modo de flambagem para o caso 02	99
Figura 5.43 – Segundo modo de flambagem para o caso 02	99
Figura 5.44 – Terceiro modo de flambagem para o caso 02	100
Figura 5.45 – Primeiro modo de flambagem para o caso 03	100
Figura 5.46 – Segundo modo de flambagem para o caso 03	101
Figura 5.47 – Terceiro modo de flambagem para o caso 03	101
Figura B.1 - Convenção de sinais para forças e momentos	112
Figura B.2 – Representação das forças e momentos atuantes nos isoladores de 13,8 kV do Banco de Capacitores	114
Figura B.3 – Representação das forças e momentos atuantes nos pára-raios	116
Figura B.4 – Aplicação forças e momentos atuantes no transformador de corrente	117
Figura B.5 – Aplicação de forças de capacitores	119
Figura B.6 – Representação simplificada da vista superior do Banco de Capacitores	120
Figura B.7 – (a) Área útil do Banco de Capacitores; (b) Área bruta do Banco de Capacitores	121
Figura B.8 – Variação da força de vento pelo ângulo de incidência para o Banco de Capacitores	122

LISTA DE TABELAS

Tabela 3.1 – Características de alguns materiais utilizados como reforços	12
Tabela 3.2 – Comparativo entre materiais estruturais de engenharia	19
Tabela 3.3 – Valores de n para correção da velocidade de vento em função da altura	29
Tabela 3.4 – Coeficientes de rugosidade do terreno	30
Tabela 3.5 – Ocorrência dos curtos-circuitos	36
Tabela 4.1 – Posicionamento e massa dos capacitores	54
Tabela 4.2 – Cargas e momentos nos isoladores e transformador	56
Tabela 4.3 – Cargas e momentos nos pára-raios e capacitores	56
Tabela 4.4 – Cargas de vento e de curto-circuito nos barramentos para os 3 casos	56
Tabela 4.5 – Distribuição da carga de vento na face 1 do BC	59
Tabela 4.6 – Distribuição da carga de vento na face 2 do BC	60
Tabela 5.1 – Área da seção transversal dos CDPs longitudinais	66
Tabela 5.2 – Área da seção transversal dos CDPs transversais	66
Tabela 5.3 – Resultados do cálculo do Módulo de Elasticidade Longitudinal	72
Tabela 5.4 – Resultados do cálculo do Módulo de Elasticidade Transversal	76
Tabela 5.5 – Resultados do cálculo do Coeficiente de Poisson Longitudinal	83
Tabela 5.6 – Resultados do cálculo do Coeficiente de Poisson Transversal	84
Tabela 5.7 – Tensão máxima de ruptura dos CDPs	84

Tabela 5.8 – Propriedades Mecânicas do PRFV utilizado	85
Tabela 5.9 – Deformações obtidas nos pontos críticos	88
Tabela 5.10 – Margens de segurança para a tensão máxima longitudinal (x-local)	95
Tabela 5.11 – Margens de segurança para a primeira barra a flambar	102
Tabela 5.12 – Margens de segurança para a segunda barra a flambar	102
Tabela 5.13 – Margens de segurança para a terceira barra a flambar	102

CAPÍTULO 1

Introdução

1.1) Considerações Iniciais

A utilização de materiais compostos em aplicações estruturais é um fato já constatado em épocas remotas. O uso de reforços naturais, como a palha pelos israelitas em 800 DC (KARBHARI, 1999) e brotos de bambu pelos egípcios em 1500 DC (KAW, 1997), comprovam esse fato.

Atualmente, os compósitos reforçados por fibras vêm conquistando um espaço cada vez mais significativo no setor da construção civil.

No ano de 1996, em um congresso realizado em Sevilla, CALAMA (1996), COMINO (1996) e JUVANDES *et al.* (1996) apresentaram seus respectivos trabalhos descrevendo algumas aplicações práticas dos compósitos poliméricos reforçados por fibras (CPRF) em diversas situações da construção civil. Seja no formato de perfis ou painéis estruturais, na associação com o tradicional concreto armado ou na reabilitação de estruturas, os CPRF's obtiveram respostas satisfatórias segundo relatos dos pesquisadores.

No entanto, a proposição de utilização de novos materiais não constitui em tarefa simples. Aspectos técnicos e até mesmo aspectos culturais podem apresentar-se como barreiras, visto que, geralmente os projetistas são conservadores e têm restrições à mudanças.

1.2) Conteúdo do Trabalho

A divisão do trabalho foi planejada da seguinte forma:

- Capítulo 2 – Objetivo

Nesse capítulo foram abordados os principais objetivos e motivação para realização deste projeto.

- Capítulo 3 – Bibliografia Consultada

Nesse capítulo foram abordados os materiais convencionais utilizados em linhas de transmissão e de subestação de energia elétrica (LT's e LS's). Uma referência global a respeito de materiais compostos também foi tema de discussão nessa oportunidade.

Um material composto tipicamente utilizado em engenharia de estruturas, denominado pultrudado, foi apresentado de forma resumida juntamente com o seu processo de fabricação. E ainda, um comparativo entre as principais propriedades desse material com materiais estruturais convencionais foi considerado.

A utilização de compósitos pultrudados em estruturas de LT's e LS's e as equações básicas utilizadas em dimensionamento foram revisadas.

- Capítulo 4 – Metodologia

Nessa oportunidade, foram descritas as considerações adotadas para os cálculos de cargas em projetos de LT e LS, a modelagem em elementos finitos, ensaios de tração para caracterização do material e a descrição do ensaio realizado na estrutura construída de material composto pultrudado.

- Capítulo 5 – Resultados e Discussão

Ao capítulo 5, foi reservado o espaço para a apresentação de resultados da modelagem por elementos finitos bem como a análise dos resultados dos ensaios realizados.

- Capítulo 6 – Conclusões

Foram relatadas as conclusões obtidas á respeito dos objetivos propostos.

CAPÍTULO 2

Objetivo

O objetivo deste trabalho foi estudar a viabilidade da aplicação de materiais compostos pultrudados a estruturas de bancos de capacitores de subestações de energia elétrica sob o ponto de vista de resistência mecânica e de estabilidade.

Como os perfis pultrudados confeccionados em material composto polimérico reforçado por fibra tem características de isolante elétrico, são ideais para a construção das estruturas dos bancos de capacitores para subestações de energia elétrica, pois evitaria assim muitas das falhas provocadas por curto-circuito e conseqüentemente a necessidade de constantes manutenções nas linhas aéreas de transmissão de energia, que é a razão principal para este projeto.

Segundo dados da CEMIG, de 1999 a 2002 foram constatados 112 casos de defeitos desta natureza ocasionados por interferências de mamíferos (gambá, ouriço-caxeiro) e aves (pombo, anu, urubu, coruja, tesourinha e gavião). Sendo assim, a adoção de material composto pultrudado, um material não condutor de eletricidade, nas estruturas de linhas de transmissão (LT) e de linhas de subestação (LS) apresenta-se como alternativa.

CAPÍTULO 3

Revisão Bibliográfica

3.1) Introdução

O baixo custo e a longevidade propiciam a alguns materiais convencionais de construção, como o aço, o concreto e a madeira, aplicabilidade em diversos setores. No entanto, como destacaram KARBHARI & ZHAO (1999), a rápida deterioração destes em condições adversas fez surgir, ao longo do tempo, uma necessidade de se buscar novas tecnologias.

Em especial, alta resistência específica, a produção contínua, as excelentes propriedades mecânicas, a resistência à corrosão e a flexibilidade de projeto, fazem dos compósitos pultrudados materiais atrativos para a aplicação estrutural (PRABHAKARAN *et al.*, 1995).

Este capítulo teve como principal função fornecer os parâmetros primordiais considerados nos projetos de LT's e LS's. Os critérios de avaliação de estruturas utilizados neste trabalho são rapidamente lembrados, bem como as suas aplicações no Método de Elementos Finitos. Além disso, também foram destacados aspectos comparativos de algumas propriedades de materiais convencionais e compósitos.

3.2) Aspectos Gerais Sobre as Linhas Aéreas de Transmissão de Energia

Segundo relatos, a distribuição subterrânea foi o primeiro modo utilizado na comercialização da energia elétrica em 1882 (LABEGALINI *et al.*, 1992). Com o passar do tempo, o aumento da demanda exigiu evoluções de ordem técnica por parte das empresas distribuidoras.

O emprego de corrente alternada (CA) desenvolvido na França em 1886 permitiu o transporte da energia em potências e tensões maiores com mais economia e eficiência. Posteriormente, em 1888, Nicola Tesla apresentou um artigo descrevendo os motores de indução e motores síncronos bifásicos. Na seqüência, as vantagens apresentadas sobre o sistema de corrente contínua (CC) fizeram com que os sistemas de corrente passassem a ter um desenvolvimento muito rápido. Inicialmente, eram sistemas monofásicos e em seguida, sistemas bi e trifásicos.

Da mesma forma, caminhava o sistema de transporte de energia. No Brasil, por exemplo, a primeira Linha de Transmissão que se tem registro foi construída por volta de 1883, na cidade de Diamantina, Minas Gerais. Segundo consta, era a linha mais longa do mundo na época (LABEGALINI *et al.*, 1992).

O crescimento do consumo de energia elétrica exigiu das concessionárias ampliações das instalações e investimentos em equipamentos mais potentes. A consequência deste fato é que a geração e o fornecimento de energia seriam economicamente viáveis somente a tensões elevadas. Surgiu então, a necessidade de um meio que pudesse reduzir as altas tensões oriundas das estações de geração para o consumo local. Este meio, que constitui um tipo de transporte aéreo de energia, denomina-se subestação. Além disso, PANSINI (1975) destacou outras funções que podem ser atribuídas às subestações, tais como:

- Dispor de dispositivos de segurança a fim de desarmar circuitos ou equipamentos em eventuais problemas;
- Regular a distribuição da tensão de partida;
- Consistir em local apropriado para tomada de medições para checar as operações de várias partes do sistema.

Em uma LT e LS constata-se a existência de diversos componentes que devem ser especificados a fim de suportar esforços de origem elétrica e mecânica. Dentre os principais componentes, destacam-se:

a) Condutores de energia

São os agentes de transporte de energia elétrica. Os condutores empregados em LT's e LS's apresentam-se nas formas de cabos ou em forma de barramentos tubulares como os utilizados nas subestações. Em ambos os casos, os materiais empregados nos condutores são cobre, alumínio e alumínio com alma de aço.

b) Isoladores

São elementos feitos de material dielétrico que auxiliam o ar no isolamento dos condutores da linha em relação aos suportes e ao solo podendo ser tipicamente fabricados de porcelana vitrificada, vidro temperado e material sintético composto. Os tipos mais comuns de isoladores empregados em Linhas de Transmissão são:

- Isoladores de pino: são fixados no suporte através de um pino de aço rosqueado e são utilizados em linhas de até 69 kV;
- Isoladores tipo pilar ou coluna: são pouco usados no Brasil. São formados por uma única peça em porcelana vidrada, vidro temperado ou materiais sintéticos compostos. Também são fixados às estruturas através de pinos rosqueados;
- Isoladores de suspensão: são empregados em dois tipos, sendo os isoladores monocrpo e de disco. Os isoladores monocrpo são feitos de uma peça longa de porcelana ou vidro, com comprimento adequado ao nível de tensão desejado (até 220 kV). Na forma de disco, são compostos de um corpo isolante de porcelana ou de vidro, sendo que nesse tipo, vários isoladores podem associar-se através de ferragens formando as cadeias de isoladores.

c) Pára-raios

Constitui a principal função do pára-raio a interceptação das descargas atmosféricas, evitando assim a danificação dos condutores. Com isto, os pára-raios têm grande contribuição na redução de incidência de interrupções no fornecimento de energia pelas linhas.

d) Suportes

São as estruturas das linhas e possuem dupla função:

- Proporcionar pontos de fixação dos condutores através dos isoladores garantindo assim, as distâncias de segurança entre condutores energizados, entre estes e partes do próprio suporte e entre os condutores e o solo;
- Amarrar, através de suas fundações, as linhas ao terreno ao qual transmitem as forças resultantes de todas as solicitações a que são submetidos os elementos que compõe o suporte.

LABEGALINI *et al.* (1992) classificam os suportes quanto à forma de resistir os esforços, onde destacaram dois grupos:

- Estruturas autoportantes: transmitem os esforços ao solo através de suas fundações. Neste tipo de estrutura enquadram-se as rígidas, as flexíveis (postes e pórticos articulados) e as mistas ou semi-rígidas (pórticos contraventados);
- Estruturas estaiadas: neste tipo de suportes são empregados tirantes ou estais (cabos de aço galvanizados) para absorver os esforços. A economia nos custos, a confiabilidade e maior compactação das estruturas são aspectos favoráveis à utilização destas estruturas. A necessidade de terrenos de topografia favorável e a maior vulnerabilidade ao vandalismo constituem objeções aos sistemas de suportes estaiados.

e) Outros componentes

Diversos componentes e dispositivos são freqüentemente utilizados em LT's e LS's. No entanto, para a realização deste trabalho, os termos definidos neste item são satisfatórios. Em LABEGALINI *et al.* (1992) são fornecidos maiores detalhes a respeito de outros componentes.

3.3) Materiais Convencionais Aplicados em Suportes de LT'S

Segundo LABEGALINI *et al.* (1992), os metais, a madeira e o concreto armado constituem os materiais convencionais utilizados em estruturas das concessionárias de energia elétrica.

A madeira é, talvez, o material estrutural mais tradicional para estruturas de linhas, podendo ser empregadas para estruturas de até 500 kV. No Brasil, o seu uso está restrito a linhas de 230 kV na forma de postes ou de pórticos. A madeira para suporte de linhas deve atender certos aspectos, tendo a obrigatoriedade de ser uma madeira de lei (a aroeira, por exemplo). Em caso de madeira não nobre, como o eucalipto, o material deve ser tratado. O intemperismo, os ataques por bactérias e microorganismos apresentam-se como aspectos desfavoráveis para a utilização desses materiais em LT's.

Podendo ser pré-fabricado no canteiro de obras, as estruturas de concreto armado nas formas autoportantes ou estaiadas tem-se apresentado como ótima alternativa para suportes de linhas mantendo viabilidade econômica para linhas de até 500 kV. Porém, por apresentar elevado peso, a instalação de estruturas feitas de concreto armado exige maquinário típico para o manuseio ficando restrito, em geral, a locais de fácil acesso por meios de transporte convencionais. Além disso, a fragilidade deste material apresenta-se como fator negativo para utilização em certas aplicações.

Como elemento estrutural, as características exigidas para os metais são:

- Alta resistência mecânica;
- Alta resistência à corrosão;
- Baixo peso específico;
- Baixo custo de produção.

Para fins estruturais, o aço ASTM-36 galvanizado a fogo apresenta-se como material aplicável em construções soldadas, rebitadas e parafusadas (GAYLORD &

STALLMEYER, 1992). A proteção por pintura também é bastante utilizada, porém, com o inconveniente de exigir renovação periódica.

Porém, ao levar em consideração os quesitos apresentados, sobretudo pelo baixo peso específico e alta resistência à corrosão, o alumínio destaca-se sobre aço galvanizado. Além disso, uma grande diversidade de perfilados de alumínio são obtidos por extrusão obtendo, em certos casos, melhores propriedades mecânicas que as das cantoneiras laminadas de aço (LABEGALINI *et al.*, 1992). Vá-se contra os perfis de alumínio o seu elevado custo.

3.4) Materiais Compostos

3.4.1) Introdução

Um material composto é um conjunto de dois ou mais materiais diferentes, combinados em escala macroscópica, para funcionarem como uma unidade, visando obter um conjunto de propriedades que nenhum dos componentes individualmente apresenta (MENDONÇA, 2005). Para CALLISTER (2002), os compósitos resultam-se de um processo de formação artificial, excluindo assim as ligas metálicas e vários materiais cerâmicos que têm a formação de suas fases como consequência de fenômenos naturais.

Grande parte dos compósitos é formada apenas por duas fases distintas: a matriz e a fase dispersa. As propriedades dos compósitos são uma função das propriedades das fases constituintes, das suas quantidades relativas e da geometria da fase dispersa, sendo que todas essas características determinam as propriedades finais dos compósitos.

A fase dispersa constitui a parte rígida de um compósito tendo a sua principal função o reforço. Tal fase pode ser classificada em três formas (KAW, 1997): partículas de tamanhos diversos, os *flakes* (flocos) e em fibras. A Figura 3.1 ilustra esta classificação.

Dentre as formas de fase dispersa apresentadas, os compósitos fibrosos são os mais importantes tecnologicamente (CALLISTER, 2002). O pequeno diâmetro atribuído às

fibras reduz a possibilidade de ocorrência de defeitos tornando-as o tipo de reforço mais eficiente sob os parâmetros de rigidez e resistência.



Figura 3.1 – As formas mais comuns da fase dispersa de um material composto

As fibras de vidro, carbono e aramida (nome comercial Kevlar[®]) são os reforços não metálicos mais utilizados. A seguir, são apresentadas algumas das aplicações típicas destes reforços (CALLISTER, 2002).

a) Fibras de vidro

A aplicação de fibras de vidro como reforço em matrizes poliméricas restringe-se, geralmente a temperaturas abaixo de 200 °C. Carcaças de meios de transporte automotivos e marítimos, tubulações de plástico, recipientes para armazenamento e pisos industriais são as aplicações mais comuns desta fibra.

b) Fibras de carbono

As fibras de carbono constituem em material de alto desempenho. Os compósitos poliméricos reforçados por fibras de carbono são largamente empregados em equipamentos esportivos e de recreação (varas de pescar e tacos de golfe), em carcaças de motores e jato enroladas com filamentos, em vasos de pressão e em componentes estruturais de aeronaves.

c) Fibras aramida

Conhecidas comercialmente como Kevlar[®] e Nomex[®], as fibras de aramida são materiais de alta resistência. Possuidoras de excelente relação resistência-peso, as fibras de aramida são freqüentemente associadas com resinas epóxis e poliésteres.

As aplicações mais comuns para este compósito são: produtos balísticos (coletes à prova de balas), artigos esportivos, pneus, cordas, carcaças de mísseis, vasos de pressão, como substituto para o amianto em freios automotivos e em revestimentos de embreagens e gaxetas.

As fibras anteriormente apresentadas são bastante atraentes em aplicações de engenharia ao levar-se em conta os elevados valores de módulo de elasticidade e de resistência mecânica específicos¹. Uma análise dos valores apresentados na Tabela 3.1 permite concluir facilmente que, as baixas densidades relativas atribuídas às fibras não metálicas as conferem propriedades específicas maiores quando comparadas aos materiais metálicos em forma de arames finos utilizados para fabricação de compósitos.

Dois fatores relativos às fibras são preponderantes nas propriedades de um compósito: o comprimento e a orientação.

É de conhecimento comum que um comprimento mínimo, também conhecido como comprimento crítico, deve ser atribuído às fibras de modo a garantir resistência e rigidez do compósito. Sabe-se também que uma maior eficiência do reforço é obtida na utilização de fibras contínuas (CALLISTER, 2002).

As propriedades mecânicas relacionadas ao grau de isotropia do material são amplamente influenciadas pelos fatores anteriormente citados. Os compósitos com fibras contínuas e alinhadas ou de fibras dispostas ortogonalmente (crossply ou tecidos) (Fig. 3.2-a) são exemplos de materiais que possuem propriedades dependentes da direção na qual são medidas, ou seja, são anisotrópicos, e conseqüentemente, estes

¹ As propriedades específicas de um material são obtidas através da razão da propriedade considerada pela densidade relativa.

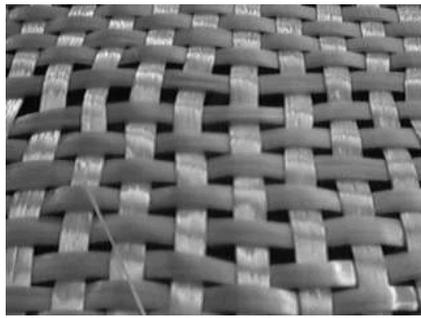
materiais possuem uma maior quantidade de parâmetros de rigidez e resistência mecânica a determinar (HASHIN, 1983).

Tabela 3.1 – Características de alguns materiais utilizados como reforços

Adaptado de CALLISTER, 2002

<i>Material</i>	<i>Densidade relativa</i>	<i>Limite de resistência à tração (GPa)</i>	<i>Resistência específica (GPa)</i>	<i>Módulo de elasticidade (GPa)</i>	<i>Módulo Específico (GPa)</i>
Óxido de alumínio	3,95	1,38	0,35	379	96
Aramida (Kevlar 49)	1,44	3,6-4,1	2,5-2,85	131	91
Carbono	1,78-2,15	1,5-4,8	0,70-2,70	228-724	106-407
Vidro E (E-Glass)	2,58	3,45	1,34	72,5	28,1
Boro	2,57	3,6	1,40	400	156
Carbeto de silício	3,0	3,9	1,30	400	133
Aço de alta resistência	7,9	2,39	0,30	210	26,6
Molibdênio	10,2	2,2	0,22	324	31,8
Tungstênio	19,3	2,89	0,15	407	21,1

Um compósito quase-isotrópico pode ser obtido por uma distribuição randômica de fibras curtas, dando origem às mantas (Fig. 3.2-b) ou então, utilizando-se de fibras longas alinhadas em várias direções (multidirecional).



(a)



(b)

Figura 3.2 – (a) Tecido de fibras de vidro, (b) Manta de fibras de vidro

Um importante tipo de compósito é o ortotrópico. Estes apresentam três eixos mutuamente perpendiculares, denominados eixos principais de simetria. Um caso particular de ortotropia, presente em muitos dos compósitos unidirecionais com fibras contínuas empacotadas em disposição hexagonal, é o compósito transversalmente isotrópico. Inclui-se nestes casos os compósitos de fibra de carbono, aramida ou de vidro com alta fração volumétrica¹ de fibra em matriz epoxídica.

Deve-se ressaltar que para um adequado projeto de compósito, o direcionamento das fibras deve ser paralelo aos esforços atuantes obtendo-se assim, rigidez e resistência elevadas.

A matriz representa a fase dúctil de um compósito. A esta fase atribuem-se as seguintes funções:

- Unir a fase dispersa proporcionando resistência mecânica ao compósito;
- Proteger a fase dispersa contra danos superficiais em função da abrasão mecânica ou de reações químicas com o ambiente;
- Transmitir e distribuir as tensões ao longo da fase dispersa;
- Separar as fibras umas das outras, prevenindo assim a propagação de trincas frágeis entre uma fibra e outra, evitando dessa forma a falha catastrófica do compósito.

¹ Razão do volume de fibra pelo volume total do compósito (DANIEL & ISHAI, 1994)

As matrizes podem ser constituídas de diversos materiais sendo as mais comuns as poliméricas, metálicas e cerâmicas. No entanto, a temperatura ambiente, a facilidade de fabricação e o custo são fatores suficientes que tornam as matrizes poliméricas a de maior aplicabilidade (CALLISTER, 2002).

Ainda sobre as matrizes poliméricas, pode-se considerar que a significativa estabilidade térmica e dimensional faz das resinas termofixas, ou seja, uma vez processadas não mais retornam ao estado líquido original impossibilitando a reutilização, o tipo de material mais utilizado como matriz em compósitos. No grupo das matrizes termofixas, as poliésteres para aplicações comerciais, industriais e transportes, e as epóxis na engenharia estrutural e na indústria aeroespacial se destacam (MANGONON, 1999).

De um modo em geral, pode-se dizer que as matrizes inicialmente citadas possuem resistência mecânica satisfatória para diversas aplicações. Porém, na escolha de uma matriz, outros parâmetros a serem considerados são importantes:

a) Afinidade com a fase dispersa

É de suma importância que as forças de ligação entre as fases sejam grandes no intuito de minimizar possíveis falhas do compósito resultantes do arrancamento da fase dispersa. A resistência final do compósito depende em grande parte da magnitude dessa ligação. Sendo assim, uma ligação adequada é essencial para maximizar a transferência de tensões entre as fases.

b) Resistência a altas temperaturas

Na maioria dos casos, as matrizes determinam a máxima temperatura de serviço do compósito. Neste aspecto, destacam-se, sobretudo as matrizes metálicas e cerâmicas. Dentre as matrizes poliméricas, as resinas polímidas são as mais resistentes a altas temperaturas, aproximadamente 230 °C para utilização em regime contínuo (CALLISTER, 2002).

c) Densidade

Geralmente, os polímeros, as cerâmicas, as ligas de alumínio, de magnésio, de titânio e de cobre possuem baixas densidades.

d) Processamento

Para as matrizes metálicas, muitos dos processos convencionais de conformação dos metais são aplicáveis como o forjamento, a extrusão e a laminação. No entanto, estes processos requerem altas temperaturas. A laminação manual, o prepeg, o enrolamento de filamento (*filament winding*) e a pultrusão são os processos mais comuns em compósitos de matriz polimérica reforçados com fibras. As baixas temperaturas para estes processamentos os tornam bastantes executáveis. Os compósitos de matriz cerâmica podem ser fabricados através da estampagem a quente, estampagem isostática a quente e técnicas de sinterização na fase líquida (CALLISTER, 2002).

3.4.2) Processo de fabricação dos CPRF's: a pultrusão

Na manufatura de Compostos Poliméricos Reforçados com Fibras (CPRF's), a condição primordial para a obtenção de um compósito com performance satisfatória é a distribuição uniforme das fibras no interior da matriz plástica e orientadas na mesma direção (CALLISTER, 2002).

Em especial, neste trabalho dá-se o devido enfoque ao processo de pultrusão pela utilização de perfis pultrudados na estrutura em estudo.

Define-se, então, a pultrusão como o processo industrial de fabricação de perfis estruturais contínuos constituídos de matriz polimérica (resina líquida, *fillers* e aditivos especializados) e reforços de fibras (mais especificamente, a fibra de vidro). Este processo (Fig. 3.3) constitui o ato de puxar continuamente fibras contínuas em *rovings* (reforço longitudinal) e em manta (reforço transversal) embebidas em resina (ao contrário de empurrar como é o caso do processo de extrusão). Após a impregnação, um material superficial denominado véu é geralmente acrescido aos perfis estruturais pultrudados. Posteriormente, através de tracionamento contínuo, os constituintes passam

por um molde de aço aquecido obtendo-se a forma desejada do perfil (pré-conformação). Já nesta etapa, inicia-se o processo de polimerização (endurecimento) e ao fim do processo, realiza-se o corte transversal do perfil conforme o comprimento estabelecido.

A pultrusão surgiu há pelo menos trinta anos nos Estados Unidos e significou um efetivo avanço na área de engenharia de materiais em relação aos materiais convencionais a base de fibra de vidro. Atualmente, a pultrusão é considerada o processo de fabricação de compósitos de maior crescimento no mercado mundial (PACIORNIK *et al.*, 2002).

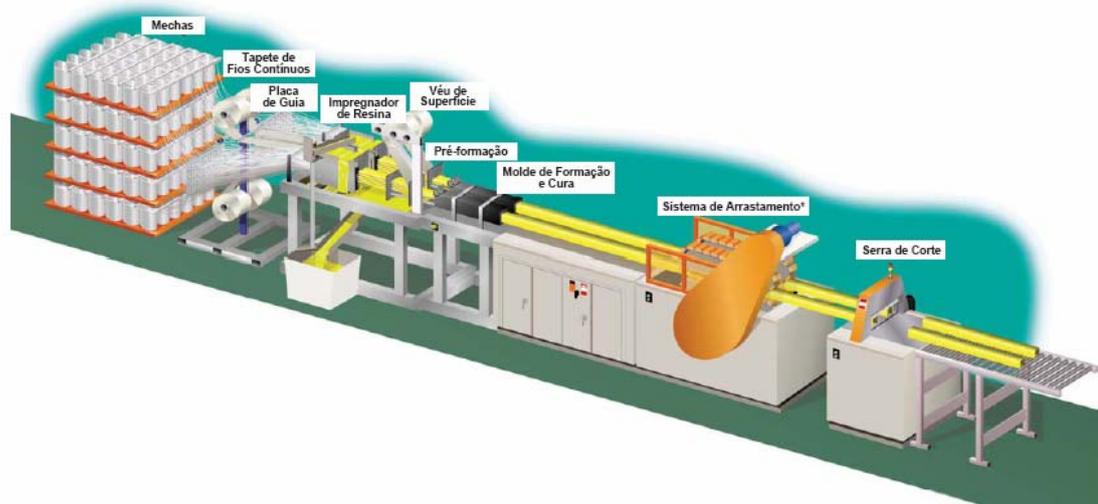


Figura 3.3 – Aspecto geral de uma máquina pultrusora

Atualmente, uma variedade de perfis pultrudados está disponível no mercado. Muitos desses materiais têm as suas formas baseadas nos perfis estruturais do aço como, por exemplo, as formas “I”, “C”, “L” e tubos (Fig. 3.4).

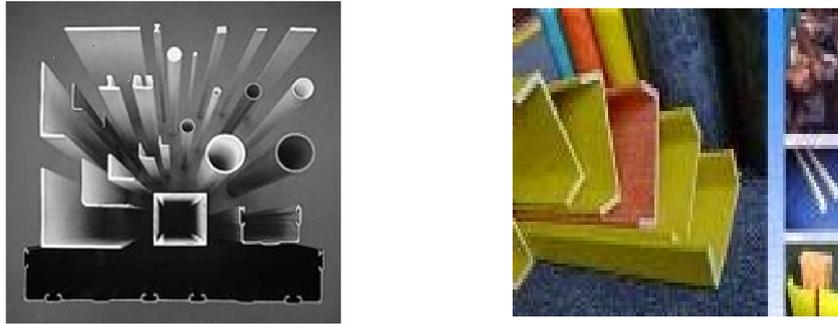


Figura 3.4 – Perfis pultrudados típicos e com coloração

3.4.3) Propriedades gerais dos CPRF's e as recentes aplicações de compósitos pultrudados na engenharia estrutural

Como dito anteriormente, as matrizes poliméricas reforçadas por fibras são os compósitos mais comuns. Uma gama de resinas está disponível comercialmente para tal fim. A associação dessas resinas com as fibras não metálicas apresentadas na Tabela 3.1 resultam em materiais com propriedades atrativas para aplicações em diversos setores. Algumas dessas propriedades foram destacadas por KARBHARI & ZHAO (1999):

a) Alta resistência e rigidez específicas

Os compósitos reforçados por fibras apresentam alta relação rigidez por peso e resistência por peso se comparados à maioria dos metais e ligas. Essas propriedades representam um grande benefício em projetos possibilitando o desenvolvimento de produtos com baixo peso e menor espessura.

b) Melhor resistência à fadiga.

Muitos compósitos são considerados resistentes à fadiga. Essa propriedade representa a maior vantagem que os compósitos de grafite/epóxi possuem sobre as estruturas metálicas na indústria aeroespacial.

Os compósitos também vêm se transformando em uma grande inovação em projetos, especialmente em área de ocorrência de abalos sísmicos.

b) Resistência à corrosão.

Ao contrário dos metais, os compósitos de matrizes poliméricas não se enferrujam. Dessa forma, um crescente interesse na utilização desses materiais como barras de reforço, grades, cabos para pré e pós-tensionamento e cabos permanentes tem sido observado.

c) Partes integráveis.

A utilização de compósitos permite a fabricação de complexas estruturas com reduzido número de operações de união e com maior segurança. Em contrapartida, a utilização dos metais em muitos casos requer diversas operações de união entre as partes resultando em aumento de custos.

d) Manipulação das propriedades.

A possibilidade de confeccionar as propriedades em direções desejadas faz dos compósitos um material eficiente e econômico possibilitando projetar materiais de maior rigidez e resistência na direção de maior esforço, poupando peso e volume nas demais direções.

No caso dos metais, como são materiais muito mais isotrópicos, se houver uma direção de maior solicitação, não há como atender os requisitos de projeto nesta direção sem superdimensionar a estrutura nas demais direções adicionando-se volume e peso desnecessários na estrutura final.

e) Propriedades não magnéticas.

O uso de compósitos de fibra de vidro como elemento estrutural representa uma excelente solução em aplicações que exigem isolamento elétrico e também em casos nos quais não são permitidas interferências em equipamentos devido à geração de ondas

eletromagnéticas, como por exemplo, em equipamentos hospitalares, em áreas de operação de radar e antenas.

f) Baixo custo-benefício

Devido à resistência à corrosão e elevada resistência a solventes, as estruturas feitas de compósitos exigem menor manutenção.

Atendo-se aos compósitos pultrudados, verifica-se que uma crescente adoção destes materiais em diversas áreas vem ocorrendo gradualmente, comprovando sua versatilidade. Elementos estruturais, carrocerias de caminhões, pisos, pontes, plataformas industriais em indústria petroquímica, componentes elétricos e eletrônicos, torres de resfriamento e componentes da indústria marítima representam uma parcela da aplicação dos materiais pultrudados na construção civil e na indústria. A Tabela 3.2 expõe uma comparação de propriedades entre os materiais convencionais de construção e o material pultrudado de fibra de vidro justificando tais aplicações.

Tabela 3.2 – Comparativo entre materiais estruturais de engenharia

<i>Propriedade</i>	<i>Pultrudado de fibra de vidro</i>	<i>Madeira estrutural</i>	<i>Aço carbono ASTM –A36</i>	<i>Alumínio estrudado</i>
Resistência à corrosão	Resistência superior a uma grande gama de substâncias.	Apresentam processo de putrefação quando exposta à umidade, água ou substâncias químicas.	Sujeito à corrosão. Em muitas aplicações, requer pintura ou galvanização.	Pode sofrer corrosão galvânica. Pode ter sua resistência aumentada por anodização.
Resistência a insetos	Não afetados por insetos	Suscetível a ataques de insetos.	Não afetados por insetos	Não afetados por insetos
Módulo de Elasticidade (GPa)	48	10-14	210	70
Condutividade elétrica	Não condutor. Alta capacidade dielétrica.	Quando molhado pode torna-se condutor.	Condutor de eletricidade.	Condutor de eletricidade.
Peso específico (kg/m ³)	1700	510	7850	2700
Resistência ao impacto	Não se deforma permanentemente abaixo do valor de resistência ao impacto.	Algumas espécies de madeiras apresentam boa resiliência, sendo capazes de absorver impactos com nível de energia elevado.	Pode se deformar permanentemente abaixo do valor da resistência ao impacto.	Deforma-se facilmente abaixo do valor da resistência ao impacto.
Custo	Baixo custo de instalação. Vida útil prolongada em aplicações industriais propiciando menores custos globais.	Baixo custo inicial de aquisição de material.	Baixo custo inicial de aquisição de material.	O processo de extrusão é relativamente barato. O preço da aquisição do material é comparável ou ligeiramente reduzido

De fato, essa tecnologia vem ao longo dos anos conquistando o seu espaço e tornando-se uma excelente alternativa aos materiais convencionais. Nos Estados Unidos e nos países da Europa, onde o mercado da fibra de vidro é mais amplo, a obtenção do sucesso nas aplicações estruturais de perfis pultrudados, simbolizada pela ponte sobre linhas de trem projetada e fabricada pela Fiberline Kolding (1997) (Fig. 3.5-a), na cidade de Kolding, Dinamarca e pelas pontes de Laurel Lick e Wickwire Run (1997) (Fig. 3.5-b) na Virgínia, têm contribuído na conquista de novos segmentos.



(a)



(b)

Figura 3.5 – (a) Ponte de perfis pultrudados, Dinamarca, (b) Aplicação de elementos pultrudados no passadiço de pontes na Virgínia

Nos Estados Unidos, recentes trabalhos realizados pela NIST's Advanced Technology Program (1998), consistiu em bateria de testes em três torres de material composto pultrudado fabricados pela Ebert Composites Corporation (San Diego, Califórnia) (Fig 3.6).



Figura 3.6 – Torres de transmissão de energia produzidas de material pultrudado, San Diego, Califórnia

Nessa oportunidade, com a utilização dessas torres, alguns ganhos foram observados:

a) Uso mais eficiente dos direitos de solo por parte das empresas fornecedoras

Devido as excelentes propriedades de isolamento elétrico e a compactada faixa de campo eletromagnético que caracterizam os compósitos, conseguiu-se transmitir e distribuir mais energia num dado espaço de terreno.

b) Maior segurança

Devido ao menor peso e maior capacidade dielétrica, as estruturas de compósitos pultrudados apresentaram-se mais seguras que as de outros materiais. A não condutividade dos compósitos permitiu que as torres fossem erguidas seguramente nas redondezas de outras linhas já energizadas.

c) Redução do custo de instalação

Devido ao menor peso, as torres de compósitos pultrudados puderam ser instaladas em um dia com menor esforço. Geralmente são necessários três dias para a instalação das torres de aço.

d) Menor impacto ambiental

As torres de pultrudados não são tóxicas e são feitas de produtos recicláveis (fibra de vidro e resina) não apresentando dessa forma, nenhum dos problemas ambientais associados com a indústria da galvanização de aço.

A experiência vivificada pela concessionária do estado da Bahia (ARQUIMACOM, 2002) ao utilizar-se de postes e de cruzetas de perfis pultrudados (Fig. 3.7), foi muito bem respaldada pelos resultados positivos apresentados nos diversos ensaios realizados pelo Instituto de Pesquisas Tecnológicas (IPT). As fotos apresentadas na Figura 3.7 retratam tal aplicação e a deterioração sofrida pelos materiais convencionais ao longo do tempo.



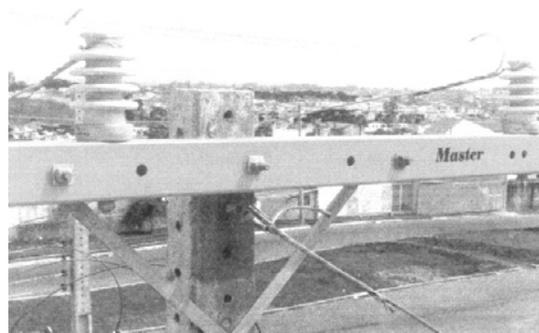
(a)



(b)



(c)



(d)

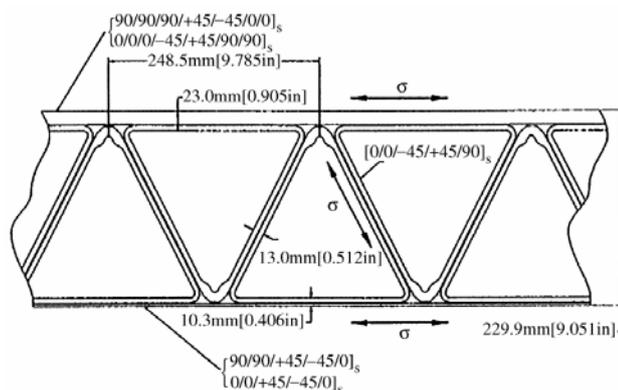
Figura 3.7 – (a) Poste de concreto armado, (b) Cruzetas de madeira e aço, (c) instalação de poste de compósito pultrudado, (d) cruzeta de compósito pultrudado

Em recentes trabalhos científicos direcionados a aplicações de pultrudados na engenharia estrutural, demonstrou-se a grande preocupação de se conhecer o comportamento destes materiais em diversas situações.

BROWN & ZUREICK (2001), por exemplo, comprovaram através de ensaios e simulações computacionais a eficácia das pontes de compósitos de seções treliçadas feitas de perfis pultrudados (Fig 3.8). Tais pontes, que são severamente requisitadas em tráfego militar, foram prontamente validadas.



(a)



(b)

Figura 3.8 – (a) Ponte montada, (b) Detalhe construtivo da treliça de pultrudados
BROWN & ZUREICK, 2001

A análise do comportamento dinâmico de armações de perfis pultrudados conectados por parafusos proposta por AHMADIAN & MANTENA (1995) apresentou resultados

experimentais favoráveis em tal situação. Além disso, comprovou-se também que a obtenção das medidas de vibrações de estruturas feita de pultrudados é obtida com sucesso utilizando-se das técnicas de análise modal. MOTTRAM & ZHENG (1997) percebendo a crescente utilização de pultrudados em estruturas armadas em diversos campos, utilizaram-se de ensaios e de modelos analíticos para estudar o comportamento das conexões parafusadas (semi-rígidas) aplicadas em tal tipo de construção na Europa e nos Estados Unidos. Observou-se nesta oportunidade que possíveis deficiências em conexões semi-rígidas poderiam ser facilmente superadas aplicando-se sapatas de aço (Fig. 3.9).

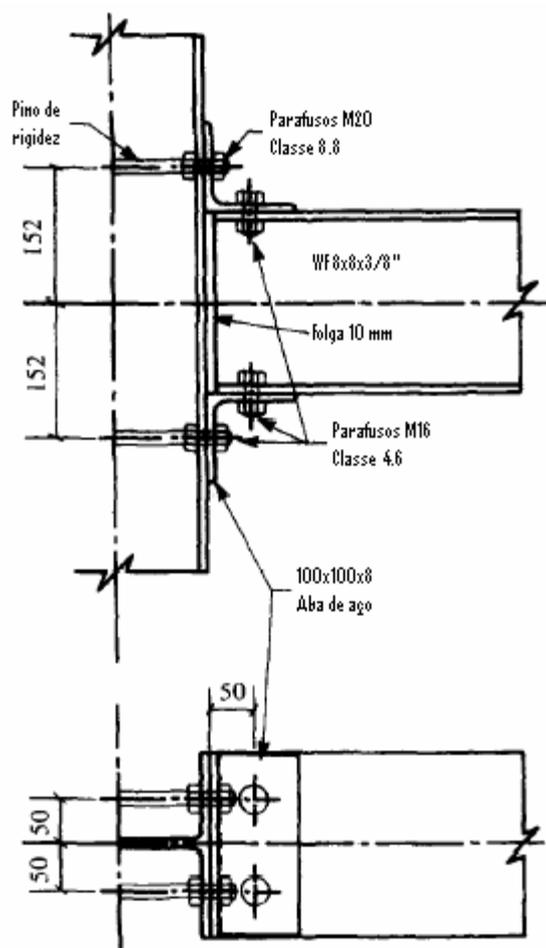


Figura 3.9 – Detalhe de conexão utilizada em estruturas de material pultrudado
MOTTRAM & ZHENG, 1997

3.5) Elementos Básicos para Projetos das Linhas Aéreas de Transmissão

3.5.1) Considerações e normas utilizadas em dimensionamento de suportes de LT's e LS's

Os suportes de uma linha de transmissão devem ser dimensionados a fim de resistir, com segurança, às solicitações a que são submetidos. Para LABEGALINI *et al.* (1992), as cargas de projetos a serem consideradas no dimensionamento de suportes de LT's e LS's são:

a) Carregamento horizontal

O carregamento horizontal é composto do carregamento de vento atuando no suporte e nos acessórios a ele pertencente. Em particular, nos condutores consideram-se também como carregamento horizontal as cargas devido ao fenômeno de curto-circuito (atração ou repulsão entre os barramentos).

b) Carregamento vertical

O carregamento vertical resulta apenas dos pesos próprios do suportes e dos acessórios.

Neste trabalho, a determinação dos carregamentos típicos em LT's teve como base três documentos:

c) Norma NBR 5422 / 1985

Conceituou os parâmetros meteorológicos e as correções (quando necessárias). Definiu as equações de carregamento resultante da pressão de vento sobre acessórios e suporte.

d) Dimensionamento de barramentos tubulares para subestações (VILELA, 1994)

Instrução utilizada pela CEMIG para dimensionamento de barramentos. Esse documento contribuiu na definição das equações para cálculo das cargas de curto-circuito e de vento atuantes no barramento.

e) The Institute of Electrical and Electronics Engineers, 1998, IEEE Guide for Design of Substation Rigid-Bus Structures.

Fornecer conceitos de ordem técnica sobre subestações e subsídios para análise estática das cargas atuantes nos barramentos.

3.5.1.1) Equações básicas de esforços horizontal para dimensionamento de componentes de subestações

Vários trabalhos realizados no intuito de determinar o efeito de vento sobre as estruturas de engenharia levaram ao reconhecimento de diversos fatores de importância na escolha dos chamados ventos de projeto. Através destes trabalhos, notou-se alguns aspectos que influenciam a velocidade do vento de projeto (V_p):

a) Rugosidade do solo

Quanto maior for rugosidade do solo, definida pela constante K_r , maior será a turbulência do vento e menor a sua velocidade.

b) Altura sobre o solo

Devido à maior turbulência próxima à superfície do solo, a velocidade do vento de projeto aumenta com a altura sobre o solo.

c) Extensão pela qual os efeitos do vento podem ser sentidos simultaneamente

Os ventos, em geral, apresentam-se na forma de rajadas, cujas frentes são pouco extensas (algumas centenas de metros).

d) Obstáculos que se opõem ao vento

Os diferentes obstáculos que se opõem ao vento possuem tempos de respostas diferentes à sua solicitação, ou seja, possuem um tempo de integração (t) diferente. Assim, sobre um determinado elemento estrutural, ventos de intensidades elevadas de curta duração podem ter efeitos menores do que os outros, menos intensos, porém de maior duração.

As considerações de tais aspectos resultaram nas equações descritas a seguir.

3.5.1.1.1 Velocidade do vento de projeto (V_p)

O cálculo de V_p é realizado a partir da determinação do valor da velocidade básica do vento, V_b . Esta última pode ser obtida através do método gráfico diretamente nas curvas isotócas constantes (Fig. 3.10) observando a localização em que se encontra instalada a linha.

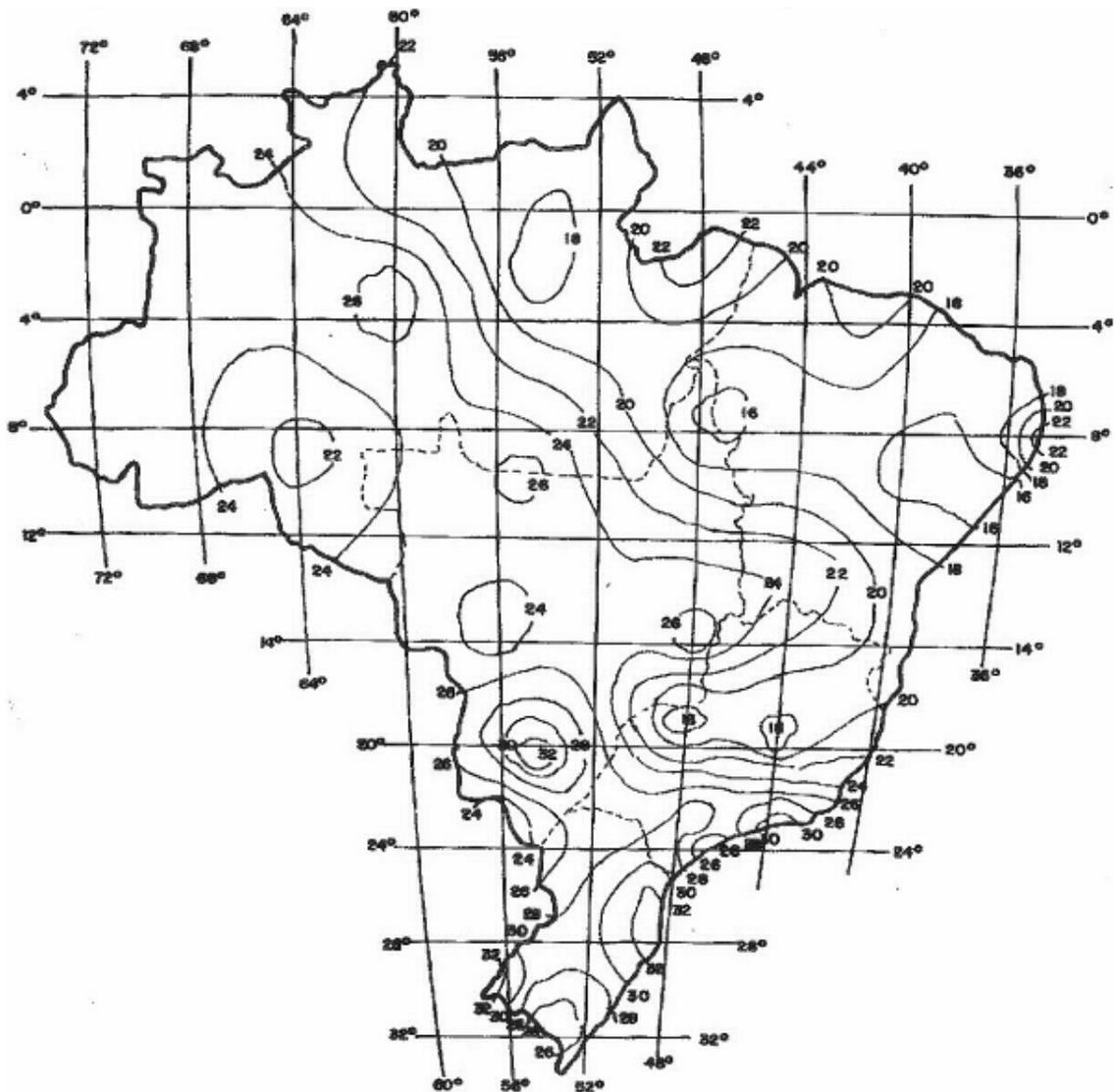


Figura 3.10 – Velocidade básica do vento no território brasileiro

Ressalta-se que as curvas isotócas fornecem V_b em duas condições específicas:

- altura de 10 m;
- período de retorno¹ (T) de 50 anos.

O período de retorno de 50 anos é considerado geralmente satisfatório, não necessitando de correção. Outros períodos podem ser considerados a critério dos proprietários das linhas aumentando ainda mais a segurança (LABEGALINI *et al.*, 1992).

Para obstáculos cuja altura sobre o solo seja diferente de 10 m, a velocidade do vento utiliza-se (Eq. 3.1):

$$V_H = V_{10} \left(\frac{H}{10} \right)^{\frac{1}{n}} \quad (3.1)$$

onde:

V_H : velocidade do vento para altura diferente de 10 m [m/s];

V_{10} : velocidade básica do vento para altura de 10 m [m/s];

H : altura do obstáculo [m];

O valor de n , que é um fator que depende da rugosidade do terreno da linha e do período de integração t (segundos), é obtido na Tabela 3.3.

¹ A Norma NBR 5422/1985 define período de retorno (T) como intervalo médio entre ocorrências sucessivas de um mesmo evento durante um período de retorno indefinidamente longo. Corresponde ao inverso da probabilidade de ocorrência do evento no período de um ano,

Tabela 3.3 - Valores de n para correção da velocidade de vento em função da altura
Norma NBR 5422/1985

<i>Categoria do terreno</i>	<i>n para t = 2 seg.</i>	<i>n para t = 30 seg.</i>
A	13	12
B	12	11
C	10	9,5
D	8,5	8

A velocidade do vento de projeto, V_P , é calculada através de (Eq. 3.2):

$$V_P = K_r K_d \left(\frac{H}{10} \right)^{1/n} V_T \quad (3.2)$$

onde:

V_P : velocidade do vento de projeto [m/s];

K_r : coeficiente de rugosidade;

K_d : coeficiente utilizado para a conversão de velocidades de vento com tempos de integração diferentes;

V_T : velocidade do vento período $T = 50$ anos [m/s]. Não havendo correção de T , $V_T = V_{10} = V_b$.

Na Equação 3.2 as constantes K_r (coeficiente de rugosidade obtido) e K_d (coeficiente utilizado para a conversão de velocidades de vento com tempos de integração diferentes) são obtidas na Tabela 3.4 e Figura 3.11 respectivamente. Deve-se observar que, $V_T = V_{10} = V_b$ quando não havendo correção de T .

Tabela 3.4 – Coeficientes de rugosidade do terreno

Norma ABNT 5422/1985

<i>Categoria do terreno</i>	<i>Característica do terreno</i>	<i>Coefficiente de rugosidade Kr</i>
A	Vastas extensões de água; áreas planas costeiras; desertos planos.	1,08
B	Terreno aberto com poucos obstáculos	1,00
C	Terreno com obstáculos numerosos e pequenos	0,85
D	Áreas urbanizadas; terrenos com muitas árvores altas.	0,67

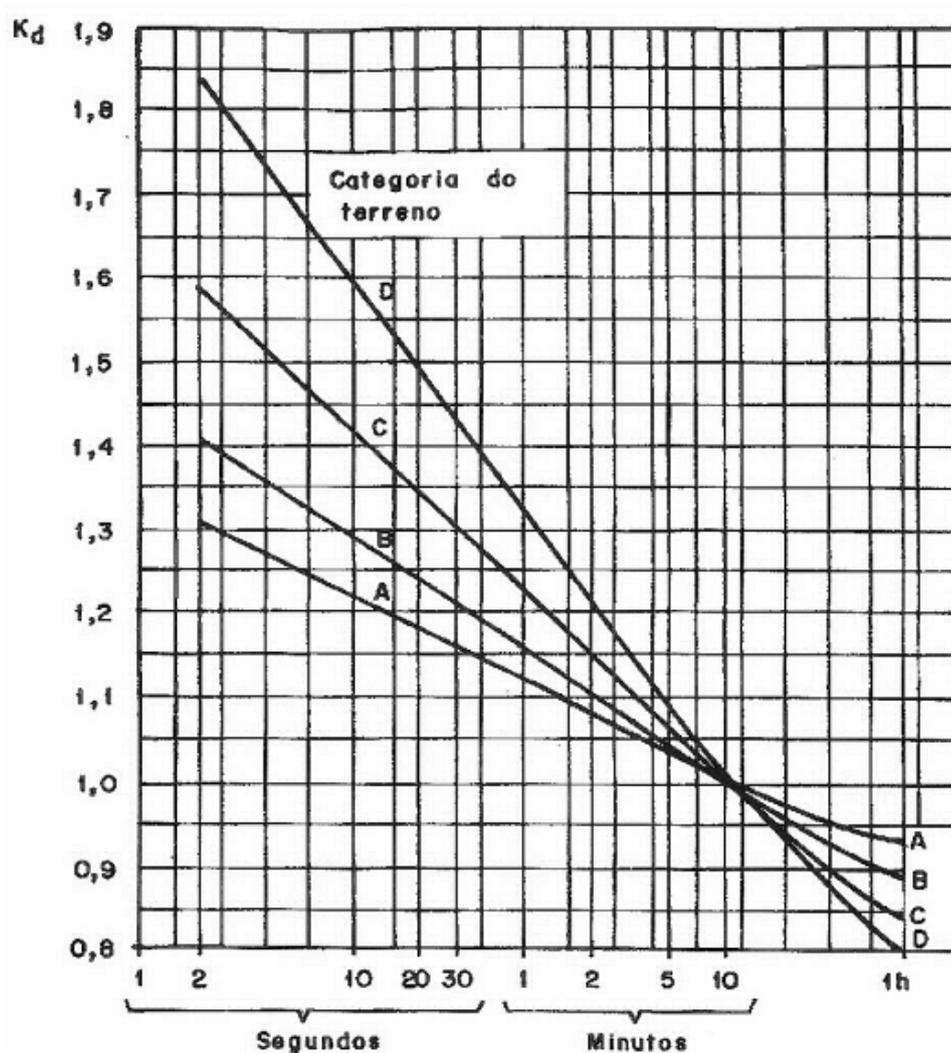


Figura 3.11 – Relação entre as velocidades médias a 10 m de altura

Norma NBR 5422/1985

3.5.1.1.2) Pressão do vento

Definindo a massa específica do ar (ρ) (Eq. 3.3):

$$\rho = \frac{1,293}{1 + 0,00367.t_c} \left(\frac{16000 + 64.t_c - ALT}{16000 + 64.t_c + ALT} \right) \quad (3.3)$$

onde:

ρ : massa específica do ar [kg/m^3];

t_c : temperatura coincidente [$^{\circ}\text{C}$] (Fig. 3.12);

ALT : altura média da região de implantação da linha [m].

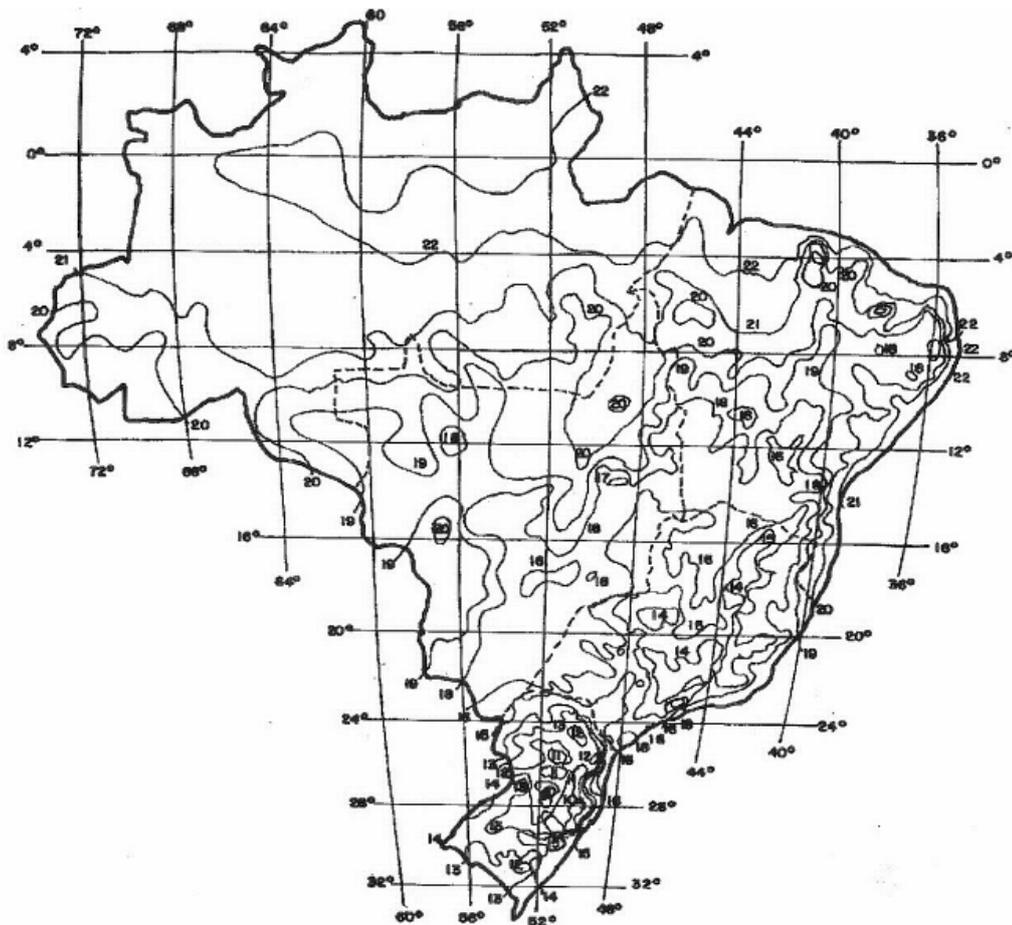


Figura 3.12 – Médias das temperaturas mínimas diárias

Norma NBR 5422/1985

Tem-se a pressão dinâmica de referência definida pela Equação 3.4:

$$q_o = \frac{1}{2} \rho V_P^2 \quad (3.4)$$

onde:

q_o : pressão dinâmica de referência [N/m²];

V_P : velocidade do vento de projeto [m/s];

ρ : massa específica do ar [kg/m³].

3.5.1.1.3) Esforços de vento atuante em acessórios

Encontra-se definida na Norma NBR 5422/1985 a equação apropriada para o cálculo do esforço de vento atuante em isoladores. Neste acessório e em outros de formato semelhante como os pára-raios, transformador de corrente e capacitores, utiliza-se (Eq. 3.5).

$$A_i = q_o \cdot C_{xi} \cdot S_i \quad (3.5)$$

onde:

A_i : esforço de vento atuante no isolador ou acessório considerado [N];

q_o : pressão dinâmica de referência [N/m²];

C_{xi} : coeficiente de arrasto;

S_i : área da cadeia dos isoladores ou acessórios projetada ortogonalmente sobre um plano vertical [m²].

3.5.1.1.4) Esforços de vento atuante nos suportes

Para suportes metálicos treliçados de seção transversal retangular, o esforço devido à ação do vento é dado por (Eq. 3.6).

$$A_t = q_o (1 + 0,2 \cdot \text{sen}^2 2\theta) (S_{T1} \cdot C_{XT1} \cdot \text{sen}^2 \theta + S_{T2} \cdot C_{XT2} \cdot \text{cos}^2 \theta) \quad (3.6)$$

onde:

A_t : esforço de vento atuante nos suportes [N];

q_o : pressão dinâmica de referência [N/m²];

θ : ângulo de incidência do vento [°] (Fig. 3.14);

S_{T1} , S_{T2} : área líquida total de uma face projetada ortogonalmente sobre plano vertical situado na direção das faces 1 e 2, respectivamente [m²];

C_{XT1} , C_{XT2} : coeficientes de arrasto próprios das faces 1 e 2 para um vento perpendicular a cada face. São obtidos na Figura 3.13 através da relação entre as áreas líquida e bruta (Φ) que constituem os suportes calculada pela Equação (3.7).

$$\Phi = \frac{\text{área líquida}}{\text{área bruta}} \quad (3.7)$$

De posse do valor obtido na Equação 3.7, utiliza-se o ábaco apresentado na Figura 3.13 de onde se obtém os valores de C_{XT1} e C_{XT2} .

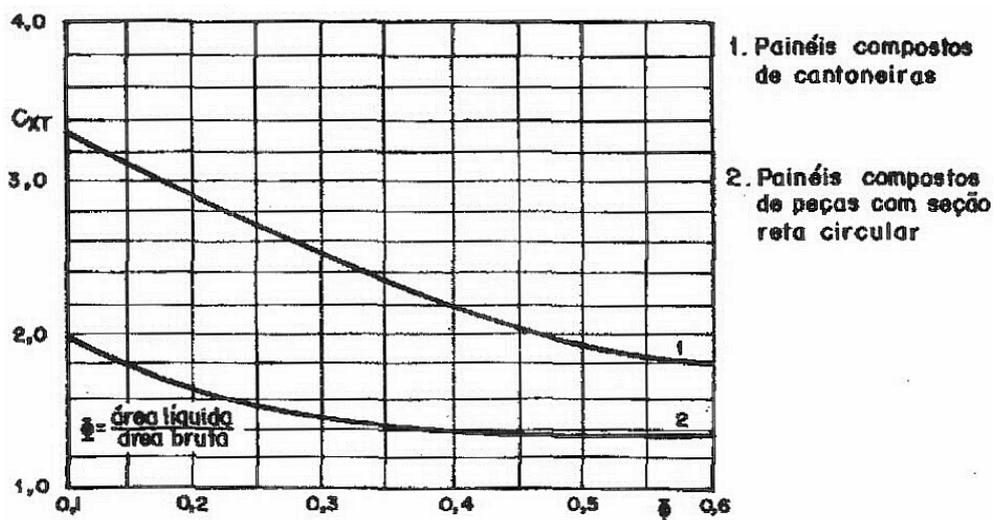


Figura 3.13 – Coeficientes de arrasto para painéis de suportes treliçadas (índice de área exposta) Norma NBR 5422/1985

Para a correta utilização da Equação 3.6, deve-se observar o ângulo de incidência, θ , do vento no suporte nas faces do suporte (Fig. 3.14).

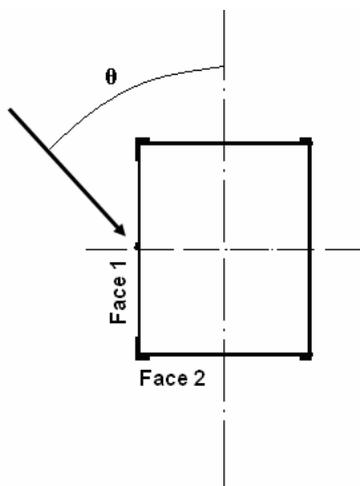


Figura 3.14 – Ação do vento sobre um tronco de suporte
Norma ABNT 5422/1985

3.5.1.1.5) Esforço nos barramentos devido à atuação do vento

Não existindo uma equação específica na norma brasileira para o cálculo de esforço de vento em barramentos e sendo o barramento um condutor, utiliza-se a equação contida na NBR 5422/1985 para o cálculo da ação de vento em cabo (Eq. 3.8).

$$A_c = q_o C_{xc} \alpha d \frac{Z}{2} \text{sen}^2 \theta \quad (3.8)$$

3.5.1.1.6) Esforço nos barramentos devido ao fenômeno de curto-circuito

As forças devido ao curto circuito têm seu embasamento nas teorias elementares do eletromagnetismo.

Tais teorias afirmam que se duas cargas elétricas estão em movimento surge entre elas força magnética (KRAUSS & CARVER, 1973). Da mesma forma, ao se considerar dois condutores “A” e “B” no ar, paralelos entre si, separados por uma distância d e

percorridos pelas correntes I e I' , a força magnética distribuída que surge entre os condutores é calculada por (Eq. 3.9):

$$\frac{F}{L} = \frac{\mu_0 I I'}{2\pi d} \quad (3.9)$$

onde:

$\frac{F}{L}$: força magnética entre os barramentos [N/m];

μ_0 : permeabilidade magnética do ar [H.m-1];

I e I' : corrente [A];

d : distância entre os barramentos.

Segundo KRAUSS & CARVER (1973) as forças de interação entre os condutores podem ser de atração, em caso de corrente movimentando-se em um mesmo sentido, ou de repulsão em caso contrário (Fig. 3.15).

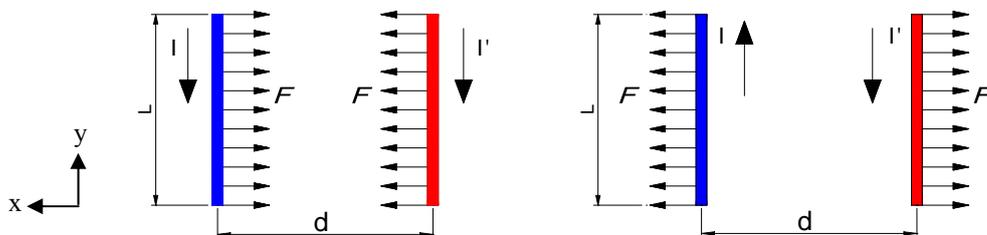


Figura 3.15 - Representação da teoria da força magnética entre dois condutores

Configurando-se em disposição paralela, horizontal e igualmente espaçada, os barramentos, que são fixados e suportados por isoladores, distribuem a corrente em três fases. Em condições normais de operação, a interação de campos eletromagnéticos faz surgir forças de interação toleráveis entre os condutores (BUDINICH & TRAHAN, 1995).

No entanto, segundo ELGERD (1976), quando algum transitório ocorre, ou seja, se algum tipo de perturbação decorrente de falta surge no sistema, uma flutuação dinâmica de estado fica caracterizada. Em especial, um transitório que ocorre freqüentemente em linhas de transmissão expostas denomina-se curto-circuito. Podem constituir as causas de um curto-circuito (ELGERD, 1976):

- rompimentos de isolação;
- existência de sal nos isoladores;
- contato de pássaros;
- outras causas mecânicas.

Mesmo sendo o curto-circuito mais raro que ocorre em sistemas elétricos, como pode ser observado na Tabela 3.6, o curto-circuito nas três fases (trifásico) é o mais grave (ELGERD, 1976).

Tabela 3.5 – Ocorrência dos curtos-circuitos
KINDERMANN, 1997

<i>Tipos de curtos circuitos</i>	<i>Ocorrência em %</i>
Trifásico	06
Bifásico	15
Bifásico-terra	16
Monofásico-terra	63

Tal falta pode levar a capacidade de transmissão de potência de uma linha a zero, necessitando portanto, da atuação da equipe de manutenção. Além disso, como lembrou ELGERD (1976), as correntes de curto-circuito podem atingir valores de pico muito superiores aos nominais dos geradores e transformadores, provocando esforços dinâmicos nos barramentos até o momento da entrada de algum sistema de proteção.

Recorrendo aos estudos do IEEE (1998), subteende-se que no momento do curto circuito a corrente atinge valores equivalentes a $2\sqrt{2}.I_{cc}$, em que I_{cc} denota o valor eficaz da corrente de curto-circuito considerada em [A].

Pela teoria de curto-circuito, a corrente alternada atrasada em praticamente 90° no instante inicial, está com 50% do seu valor máximo sendo que, a soma das três correntes deve ser igual a zero (Roepert, 1975). Sendo assim, três casos de forças de curto-circuito, CC, podem ser generalizados (Figs. 3.16, 3.17 e 3.18).

a) **Caso 1** (Fig. 3.16)

As correntes percorrem o mesmo sentido nas fases “A” e “C” e um sentido contrário na fase “B”.

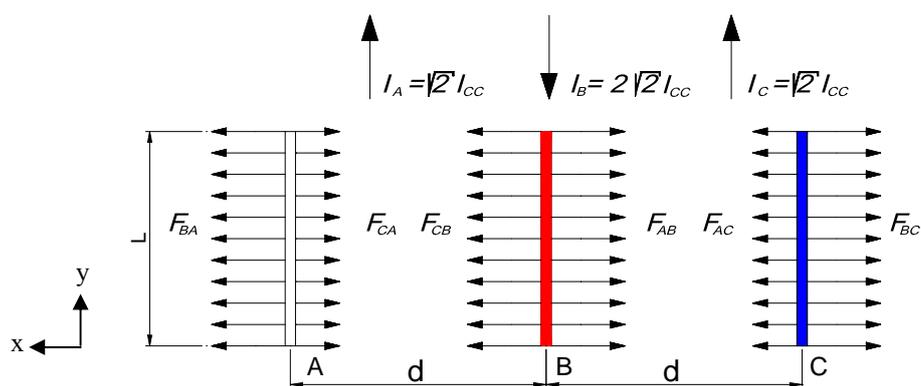


Figura 3.16 - Representação da teoria de força de curto-circuito para o caso 1

As forças resultantes em cada fase são obtidas pelas Equações 3.10, 3.11 e 3.12:

$$P_{CA} = F_{BA} - F_{CA} \tag{3.10}$$

$$P_{CB} = F_{CB} - F_{AB} \tag{3.11}$$

$$P_{CC} = F_{AC} - F_{BC} \tag{3.12}$$

b) **Caso 2** (Fig. 3.17)

As correntes percorrem o mesmo sentido nas fases “A” e “B” e em sentido contrário na fase “C”.

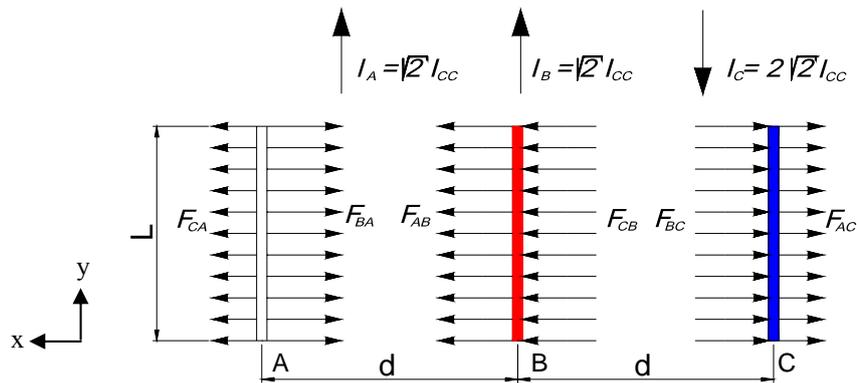


Figura 3.17 - Representação da teoria de força de curto-circuito para o caso 2

As forças resultantes em cada fase são obtidas pelas Equações 3.13, 3.14 e 3.15:

$$P_{CA} = -F_{BA} + F_{CA} \quad (3.13)$$

$$P_{CB} = F_{CB} + F_{AB} \quad (3.14)$$

$$P_{CC} = -F_{BC} - F_{AC} \quad (3.15)$$

c) **Caso 3** (Fig. 3.18)

As correntes percorrem o mesmo sentido nas fases “B” e “C” e em sentido contrário na fase “A”.

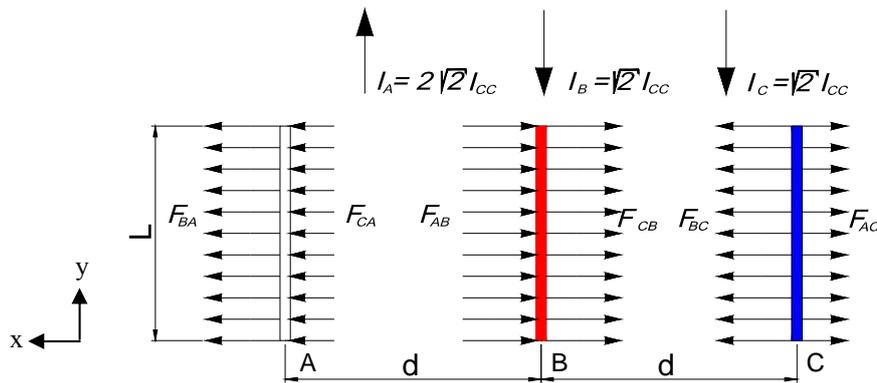


Figura 3.18 - Representação da teoria de força de curto circuito para o caso 3

As forças resultantes em cada fase são obtidas pelas Equações 3.16, 3.17 e 3.18:

$$P_{CA} = F_{BA} + F_{CA} \quad (3.16)$$

$$P_{CB} = -F_{CB} - F_{AB} \quad (3.17)$$

$$P_{CC} = -F_{AC} + F_{BC} \quad (3.18)$$

3.6) Critérios de Análise de Estruturas: Resistência Mecânica e Estabilidade

Dois parâmetros de análise estrutural definidos por POPOV (1984) são frequentemente utilizados neste estudo: resistência mecânica e estabilidade.

3.6.1) Resistência mecânica

Define-se a resistência mecânica de uma estrutura como sua capacidade de suportar um determinado carregamento sem que ocorram nos materiais tensões excessivas (BEER, 1995).

Para o dimensionamento de elementos estruturais, considera-se uma resistência atuante mais baixa que a resistência última considerada. Essa menor resistência denomina-se tensão admissível.

POPOV (1984) justifica este critério considerando que:

- os valores exatos das forças que poderão atuar sobre a estrutura raramente são conhecidos;
- os materiais não são inteiramente uniformes;
- alguns materiais se deformam de valores não permissíveis antes da ruptura real;
- alguns materiais podem ser seriamente corroídos;
- alguns materiais escoam plasticamente sob a ação de uma carga de longa duração, segundo o fenômeno denominado fluência.

Por tais razões, uma relação designada por coeficiente de segurança (Eq. 3.19) pode ser estabelecida como:

$$C.S = \frac{\sigma_{ult}}{\sigma_{adm}} \quad (3.19)$$

onde:

$C.S$: coeficiente;

σ_{ult} : tensão limite de resistência do material;

σ_{adm} : tensão admissível do material.

Em alguns campos de engenharia, principalmente na engenharia aeronáutica, utiliza-se a margem de segurança (**MS**) ao invés do coeficiente de segurança (Eqs. 3.20 e 3.21) sendo definida como:

$$MS = CS - 1 \quad (3.20)$$

$$MS = \frac{\sigma_{ult}}{\sigma_{adm}} - 1 \quad (3.21)$$

O modo de ruptura do material é uma importante característica a se considerar na escolha do coeficiente de segurança.

Os materiais dúcteis apresentam grande deformação antes de atingir a ruptura, e esse comportamento do material fornece um aviso de que está ocorrendo escoamento. Sendo assim, para estes materiais, adota-se a tensão de escoamento como a tensão limite de resistência. O aço comum, por exemplo, apresenta uma tensão última tração de 400 MPa ou mais. Todavia, ele se deforma um tanto subitamente a um nível de tensão de 250 MPa (tensão de escoamento), sendo que uma tensão admissível de aproximadamente 150 MPa é utilizada para trabalho estrutural ($CS \cong 1,67$).

Materiais frágeis apresentam ruptura repentina, sem nenhuma indicação de que o colapso é iminente. Dessa forma, o valor a se adotar para o coeficiente de segurança desses materiais deve ser maior do que em materiais que não tem característica frágil.

3.6.2) Estabilidade

A estabilidade de uma estrutura é representada por sua capacidade de suportar um determinado carregamento sem sofrer uma súbita mudança em sua configuração (BEER, 1995).

Barras longas, também conhecidas como colunas, quando submetidas a uma carga que aumenta progressivamente, podem sofrer uma flexão lateral (encurvamento) caso dimensionamento não esteja correto. Sendo assim, as tensões atuantes em qualquer seção transversal dessas barras estarão acima das tensões admissíveis e os valores de deformações estarão fora das especificações recomendadas caracterizando então, o fenômeno de flambagem.

Como lembrou COSTA (1974), o início do fenômeno é bastante rápido e imperceptível a olho, e uma coluna aparentemente estável torna-se, na verdade, lateralmente instável.

A fórmula para o estudo de uma barra sob flambagem foi pela primeira vez determinada pelo matemático suíço Leonhard Euler (COSTA, 1974). Em seu estudo, Euler considerou o caso de uma barra de comprimento L articulada nas extremidades (biarticulada). Para este caso, denominado fundamental, o valor de carga crítica, P_{cr} , que uma barra poderia suportar sem que ocorresse o fenômeno de flambagem seria (Eq. 3.22):

$$P_{cr} = \frac{\pi^2 EI}{L^2} \quad (3.22)$$

onde:

P_{cr} : carga crítica de flambagem;

I : menor momento de inércia da seção transversal;

E : módulo de elasticidade;

L : comprimento da barra.

Definindo I como (Eq. 3.23):

$$I = A.r^2 \quad (3.23)$$

onde:

r : raio de giração mínimo da seção transversal.

E sabendo que (Eq. 3.24):

$$\sigma_{cr} = \frac{P_{cr}}{S} \quad (3.24)$$

onde:

S : área da seção transversal;

tem-se então, a tensão crítica de flambagem (σ_{cr}), dada por (Eq. 3.25):

$$\sigma_{cr} = \frac{\pi^2 E}{\left(\frac{L}{r}\right)^2} \quad (3.25)$$

Porém, as soluções dos problemas de flambagem também são muito sensíveis em relação aos vínculos de extremidade (POPOV, 1984). Esta variável influencia diretamente no comprimento efetivo de flambagem (L_e) da barra obtendo-se maiores ou menores valores de σ_{cr} .

Para o caso fundamental ($L_e = L$) e para os demais, os valores de comprimentos efetivos estão definidos na Figura 3.19.

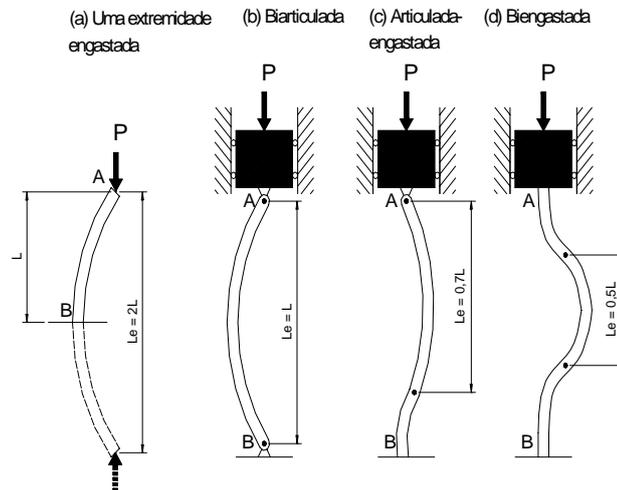


Figura 3.19 – Comprimento de flambagem para várias situações de extremidade

Reescrevendo a Equação 3.25 em função do comprimento de flambagem, L_e , em vez do comprimento geométrico (L), obtém-se (Eq. 3.26):

$$\sigma_{cr} = \frac{\pi^2 E}{\left(\frac{L_e}{r}\right)^2} \quad (3.26)$$

A razão L_e / r é conhecida como índice de esbeltez efetivo da barra. Generalizando, tem-se (Eq. 3.27):

$$L_e = KL \quad (3.27)$$

onde:

K : fator de comprimento efetivo valendo 2, 1, 0,7 ou 0,5 conforme os vínculos de extremidades (Fig. 3.19).

Em aplicações práticas, o critério para a escolha de L_e é muito importante. Em muitos casos, este valor é obtido por testes. Nas estruturas metálicas de edifícios e pontes, o coeficiente para extremidades rebitadas é $K = 3/4$ e para extremidades com pinos $K = 7/8$ devido a certa resistência do atrito existente. No entanto, onde há dúvidas no critério a adotar, usa-se $K = 1$ (COSTA, 1974).

3.7) Método dos Elementos Finitos (MEF) Aplicado à Análise Estrutural

3.7.1) Considerações iniciais

Nas atividades de engenharia, os profissionais se deparam com problemas estruturais de diversos graus de complexidade. Dos problemas mais simples aos métodos analíticos clássicos, apoiados nos teoremas da Mecânica Geral e Resistência dos Materiais, são suficientes para a obtenção das respostas exatas dos deslocamentos, deformações e tensões da estrutura.

No entanto, a maioria dos problemas estruturais de ordem prática é muito complexa para serem analisados pelas técnicas clássicas. Uma maneira generalizada de tratar tais problemas consiste na obtenção de soluções aproximadas utilizando-se métodos numéricos de análise. A este tratamento de problemas complexos de engenharia dá-se o nome de Método de Elementos Finitos (MEF).

O princípio básico do MEF constitui na discretização (divisão em partes) de um sistema contínuo em um número finito de elementos conectados por nós. Dessa forma, o comportamento interno de cada elemento pode ser determinado conhecendo-se o deslocamento de cada nó. FILHO (2000) considerou que existem três grandes etapas no MEF:

a) Pré-processamento

Consiste na idealização do problema incluindo a elaboração da malha (subdivisão da estrutura em elementos) e a aplicação das condições de contorno e carregamentos. Deve-se sempre ter em mente que escolha do elemento apropriado para modelar uma dada solução física é de grande importância no MEF, pois o elemento formulado deve corresponder ao comportamento físico da estrutura. Do ponto de vista prático, as Plataformas Computacionais (PC) (*softwares*) de Elementos Finitos oferecem uma biblioteca de elementos do programa contendo diversos elementos.

Em uma modelagem de estrutura de subestação sujeita a forças de curto-circuito, por exemplo, BUDINICH & TRAHAN (1995) utilizaram o elemento de viga em análise dinâmica. Nessa oportunidade, resultados bastante acurados foram obtidos.

b) Processamento (solução)

Realização dos cálculos para a determinação de deslocamentos, reações de apoio e forças internas nos elementos.

c) Pós-processamento

Nessa etapa, são interpretados os resultados numéricos dos cálculos efetuados.

3.7.2) Plataforma computacional ANSYS e a análise estrutural

Ao longo do tempo, as ferramentas computacionais possuidoras de excelentes interfaces gráficas, têm contribuído grandemente na geração do modelo. A verificação de tensões na estrutura, por exemplo, tornou-se mais fácil ao associar uma escala de cores às intensidades das tensões obtidas.

Dentre os *softwares* comerciais disponíveis para análises de projetos estruturais, destaca-se a Plataforma Computacional denominada ANSYS.

Possuidor de uma biblioteca de mais de 100 tipos de elementos, o programa ANSYS permite aos usuários realizar as análises anteriormente referenciadas. Para isto, os conceitos intrínsecos ao *software* são (HELP ANSYS 5.7):

a) Resistência mecânica da estrutura

As soluções nodais associadas aos elementos de viga (*stress* e *strain*) vinculam o subíndice x à direção axial do elemento associando os valores positivos ao esforço de tração e os negativos ao de compressão.

b) Estabilidade da estrutura (flambagem)

A análise de flambagem pela PC ANSYS (*buckling analysis*) consiste na determinação da carga crítica na qual a estrutura se torna instável. Para isto, o programa calcula o auto-valor (λ) considerando barras bi-engastadas, conforme a Equação 3.28.

$$\lambda = \frac{\sigma_{cr}}{\sigma_{atu}} \quad (3.28)$$

onde:

λ : auto valor;

σ_{cr} : tensão crítica de flambagem e σ_{atu} : tensão atuante na barra.

Na análise de flambagem, uma margem de segurança em relação à flambagem, MS_f , é definida como (Eqs. 3.29 e 3.30):

$$MS_f = \lambda - 1 \quad (3.29)$$

$$MS_f = \frac{\sigma_{cr}}{\sigma_{atu}} - 1 \quad (3.30)$$

CAPÍTULO 4

Metodologia

4.1) Introdução

A metodologia de trabalho apresentou as seguintes etapas:

- definição da estrutura de LS's;
- ensaios de tração para caracterização do material pultrudado;
- cálculo das cargas atuantes na estrutura segundo normas;
- modelagem da estrutura em Elementos Finitos para validação do ensaio (Caso 4) e para estudo dos casos de curto circuito (Casos 1, 2 e 3);
- ensaio da estrutura real construída em material composto pultrudado para a validação do MEF;
- simulação do modelo de validação do ensaio (Caso 4) utilizando resultados obtidos no ensaio da estrutura real.

4.2) A Estrutura de Estudo: Banco de Capacitores ou Pórtico A12

Uma estrutura típica da concessionária de energia elétrica CEMIG, denominada Banco de Capacitores ou Pórtico A12 (Apêndice A), foi determinada como alvo de estudo.

Tal estrutura tem como finalidade a sustentação de equipamentos em subestações de energia elétrica. Vislumbrando a montagem em tamanho real desta estrutura para a validação do modelo em Elementos Finitos, dois aspectos foram relevantes na escolha do Banco de Capacitores para o respectivo estudo: as pequenas dimensões e a geometria

simplória a ela atribuída quando comparada à grande maioria de outras estruturas utilizadas em subestações, facilitando então a parte operacional do trabalho.

4.3) Caracterização do Material Pultrudado

Para a montagem da Estrutura de Validação foram adquiridos da WPP os perfis PullPlast Série 525 com resina poliéster isoftálica (resina resistente à maioria dos ataques ácidos) com aditivo retardante de chamas e inibidor de ultravioleta (UV). Há uma grande variação no grau de degradação por UV conforme a cor do perfil (acrescido à utilização de um véu de superfície que aumenta em muito o grau de proteção contra esta degradação).

No intuito de avaliar as propriedades mecânicas (módulo de elasticidade, coeficiente de Poisson e resistência máxima à tração), foram retiradas amostras do material pultrudado na direção longitudinal do perfil L (Fig 4.1), região onde as fibras estão dispostas no sentido longitudinal, e amostras retiradas na aba do perfil U (Fig. 4.2), onde as fibras estão dispostas transversalmente ao comprimento da aba, totalizando assim 12 (doze) corpos de prova (Fig. 4.3) para realização dos ensaios de tração. As figuras 4.1 e 4.2 mostram as dimensões das amostras, sendo o comprimento e largura, porém, a espessura é a mesma para ambas as amostras (Fig. 4.1). Seguiu-se os procedimentos da Norma ASTM D 3039.

Foram colados na parte central dos corpos de prova *Strain Gauges* nas direções longitudinal e transversal (Fig. 4.3).

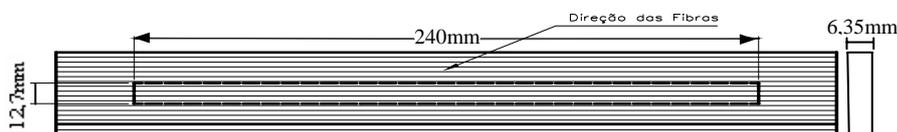


Figura 4.1 – Modo de retirada do material pultrudado para a confecção de corpos de prova (Fibras Longitudinais)

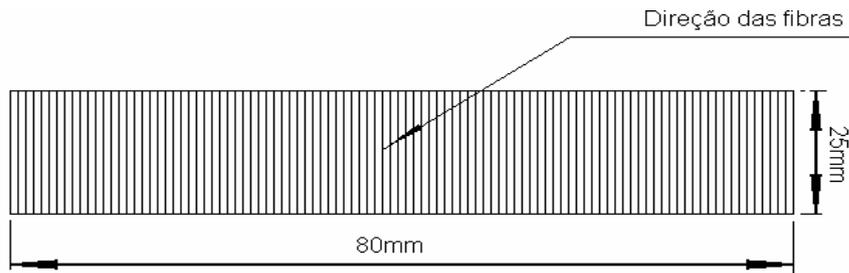


Figura 4.2 – Modo de retirada do material pultrudado para a confecção de corpos de prova (Fibras Transversais)

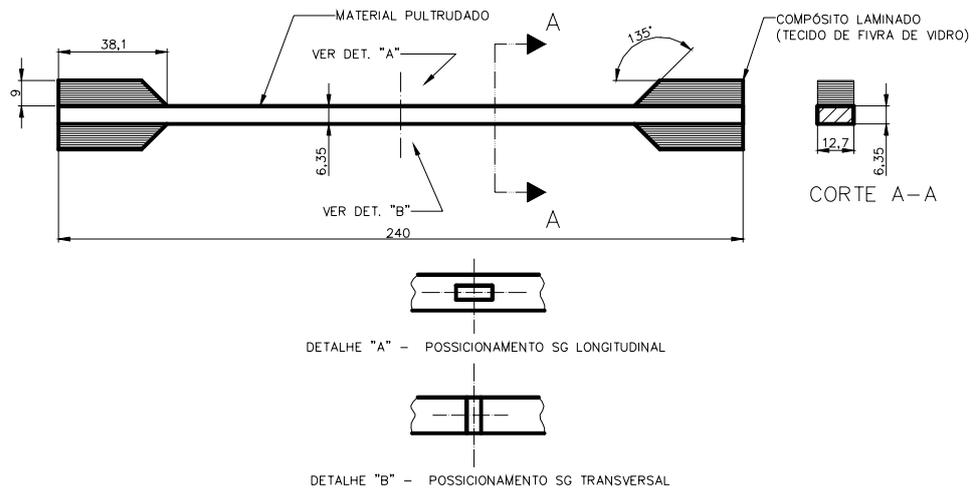


Figura 4.3 – Corpo de prova de material pultrudado

A Figura 4.4 ilustra o corpo de ensaio preso às garras da máquina de ensaio. A bateria de ensaio foi realizada utilizando uma máquina de ensaio de tração Marca INSTRON de capacidade 10 ton. do Centro de Desenvolvimento da Tecnologia Nuclear (CDTN-UFG), no qual a velocidade de tração utilizada e os outros parâmetros adotados no ensaio também foram de acordo com a Norma ASTM D 3039.



Figura 4.4 – Máquina de Ensaio Marca INSTRON do Laboratório do CDTN-UFGM

4.4) Cálculo das Cargas Atuantes no Banco de Capacitores

No Apêndice B, são apresentadas as considerações, parâmetros adotados e os cálculos segundo normas para o estudo em MEF do Banco de Capacitores, com as devidas justificativas.

As cargas atuantes na estrutura foram divididas em categorias básicas, sendo elas, as cargas referentes ao peso (capacitores e estrutura), cargas de vento e cargas provocadas por curto-circuito. Determinaram-se então as cargas para o MEF de validação do ensaio (Tab. 4.1) e as cargas para estudo de 3 (três) casos de curto-circuito (Tab. 4.2, 4.3 e 4.4).

4.5) Modelagem do Banco de Capacitores em Elementos Finitos

4.5.1) Introdução

Na modelagem em Elementos Finitos do Banco de Capacitores em material pultrudado (Apêndice C) foram mantidas as dimensões básicas oriundas do projeto inicial da estrutura em aço (Apêndice A). Tanto na modelagem em MEF, quanto no projeto da Estrutura de Validação, tiveram como base os perfis pultrudados padrão da Webber Perfis Pultrudados (WPP) conforme se segue:

- perfil U de dimensões 28,6x28,6x101,6x6,35 mm (Fig. 4.5-a) em substituição ao perfil de aço de 1.5/8"x1.5/8"x4"x1/4";
- perfil L de dimensões 50,8x50,8x6,35mm (Fig. 4.5-b) em substituição ao perfil de aço de mesmas dimensões;
- perfil duplo L (Fig. 4.5-c) em substituição ao perfil de aço de dimensões 3"x3"x5/16".

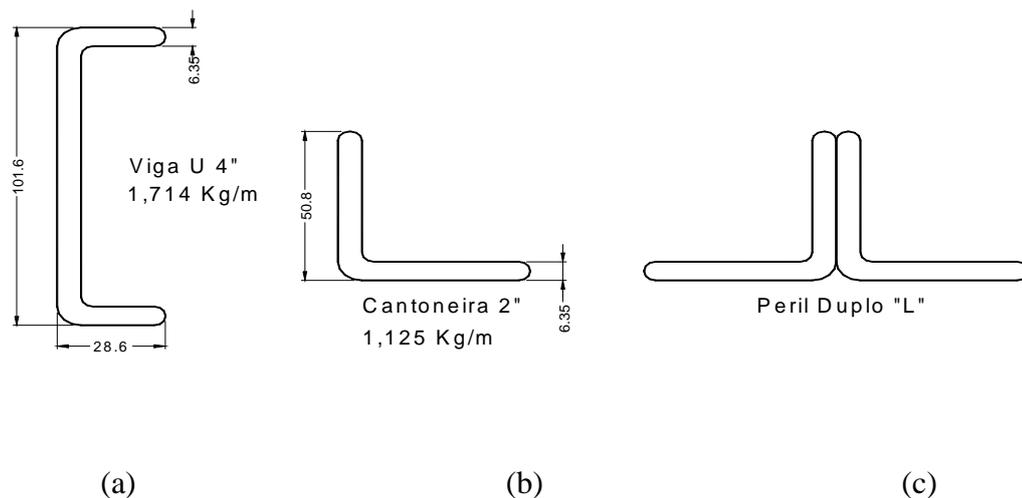


Figura 4.5 – (a) Perfil U, (b) Perfil L, (c) Perfil duplo L

Para a modelagem da Estrutura utilizou-se o elemento BEAM 189-3D da Plataforma Computacional ANSYS 5.7. Tal elemento (Fig. 4.6) é satisfatório para analisar vigas esbeltas ou robustas permitindo a análise de vigas compostas como, por exemplo, vigas fabricadas de dois ou mais partes de materiais unidos para formar uma única viga sólida. Pelo fato deste elemento ser dotado de 3 (três) nós, consegue-se distribuir os esforços de forma homogênea pelo elemento, assumindo assim que as partes são unidas perfeitamente, e essa característica leva vantagem sobre os outros tipos de elementos para essa aplicação. Conforme o próprio Help do Ansys informa, este elemento é o ideal para análise de flambagem, além de permitir também perfis na seção transversal.

Um outro fator preponderante na utilização do elemento de viga para o MEF do Banco de Capacitores encontra-se no fato de tal elemento permitir o estudo de modo independente dos fenômenos relacionados a esforços mecânicos. (FILHO, 2000).

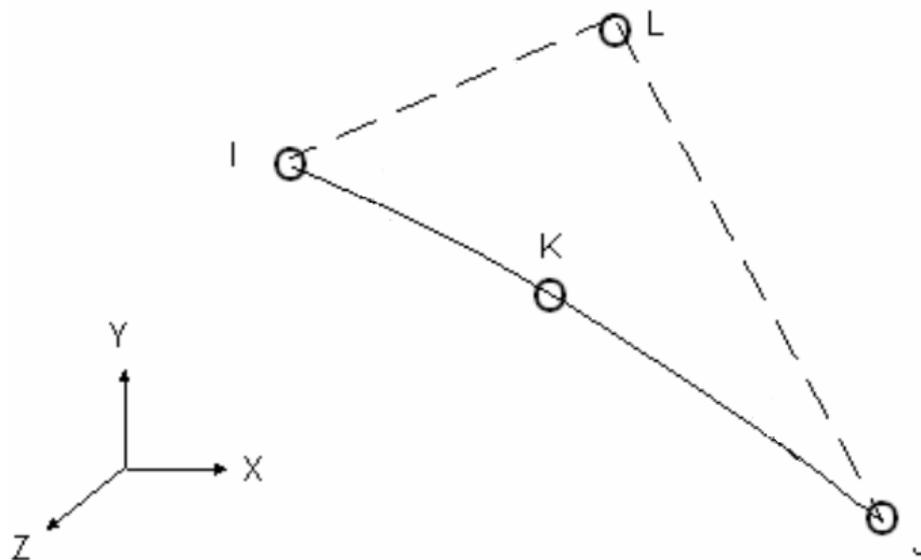


Figura 4.6 – Elemento *BEAM 189-3D*

Para o elemento *BEAM 189-3D* da Plataforma Computacional ANSYS pode-se utilizar seis ou sete Graus de Liberdade (DOF). O DOF em cada nó depende do valor de

KEYOPT (1). Tem-se para KEYOPT (1) = 0 seis graus de liberdade incluindo as translações e rotações nos eixos x, y, e z. Porém ao se considerar KEYOPT (1) = 1, um sétimo grau de liberdade relativo a valor de deformação (WARP) também é considerado.

O *BEAM 189* pode ser utilizado para qualquer seção de viga. Esta, por sua vez, é associada a um número de identificação que constitui em um atributo independente ID (SECNUM). Para a utilização do BEAM 189 foram fornecidos ao ANSYS os seguintes dados de entrada:

- Nós: I, J, K e L sendo o nó L sempre obrigatório para se definir a orientação do elemento. Sendo assim, cada perfil foi orientado utilizando-se de *Key Points* auxiliares como referência.
- Graus de liberdade: U_X , U_Y , U_Z , ROT_X , ROT_Y e ROT_Z em caso de KEYOPT (1) = 0 (padrão) assumindo que a deformação da seção transversal é muito pequena, podendo ser desprezada.
- Dados da seção: espessuras (Figs. 4.5-a, 4.5-b e 4.5-c).

Um sistema de coordenadas local para o elemento de viga é mostrado Figura 4.7. O eixo x está alinhado com o eixo longitudinal do elemento, enquanto os eixos y e z estão posicionados nas transversais definindo a seção transversal do elemento. Letras minúsculas foram adotadas para representar os eixos x, y e z do sistema de coordenadas local do elemento de viga.

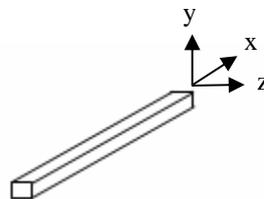


Figura 4.7 – Sistema de coordenadas local do Elemento de Viga

Para ambos os modelos descritos a seguir, foram utilizadas as propriedades mecânicas do material, obtidas através dos ensaios do programa de caracterização do mesmo.

4.5.2) Modelo para validação do ensaio

Este MEF foi projetado para realizar uma comparação com os resultados do ensaio real da estrutura que será descrito no item 4.6.

Os isoladores entre os módulos do Banco de Capacitores (Apêndice A), foram representados por barras cilíndricas e maciças de diâmetro 45 mm com módulo de elasticidade de 200 GPa, objetivando desta forma manter rigidez próxima do valor original e retratar as características próximas da condição real. O Banco de Capacitores como um MEF apresentou as seguintes características:

- número de graus de liberdade: 13974;
- número de elementos: 1891;
- número de nós: 5586;
- condições de contorno: modelo engastado nas direções x, y e z em quatro pontos (Fig. 4.8).

4.5.3) Aplicação das cargas e momentos no MEF de validação do ensaio

Para o MEF da Estrutura de Validação foram realizadas simulações considerando as duas cargas mais significativas atuantes em um Banco de Capacitores tipo A12: o peso dos capacitores e a carga de vento mais crítica (Apêndice B). O peso dos capacitores é relevante para esta análise, visto que os mesmos têm massas consideráveis por serem dotados de óleo em seu interior, portanto, a representação de cargas concentradas aplicadas ao modelo retrata a posição do centróide de cada capacitor na estrutura.

Foram determinados os pesos dos 15 (quinze) capacitores (Tab. 4.1).

Tabela 4.1 – Posicionamento e peso dos capacitores

	<i>Posição (pontos) - P (N)</i>				
1º Nível	69 – 479,71	63 – 482,65	52 – 489,52	45 – 498,35	17 – 485,60
2º Nível	77 – 487,56	64 – 487,56	57 – 486,58	46 – 490,50	20 – 502,27
3º Nível	79 – 495,41	67 – 491,48	68 – 491,48	51 – 502,27	23 – 491,48

Uma carga concentrada equivalente foi aplicada no topo da estrutura, formando um ângulo de 14° em relação à face plana da estrutura, com o propósito de simular a força crítica de vento, posicionada de tal forma a simplificar a realização do ensaio de validação.

A Figura 4.8 ilustra os pontos de aplicação de tais cargas.

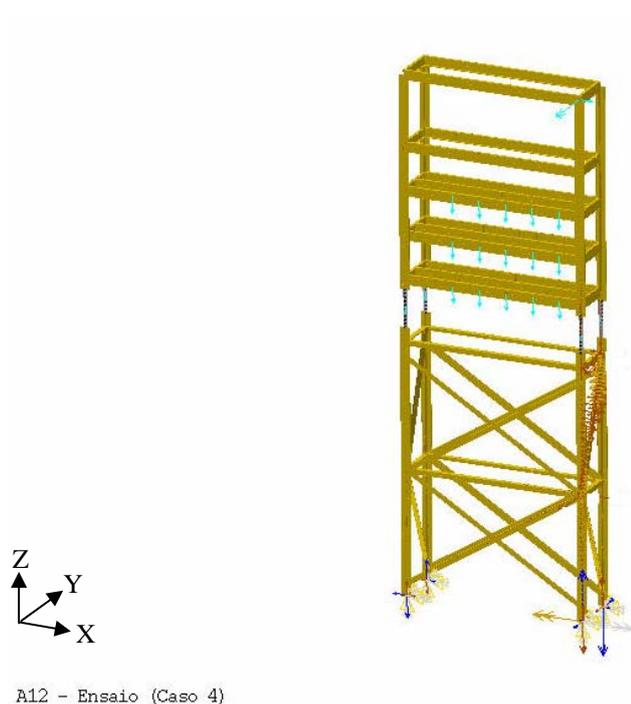


Figura 4.8 - Pontos de aplicação de cargas para a Estrutura de Validação

4.5.4) Modelos para estudo dos casos de curto-circuito

Para o estudo dos casos de curto-circuito, foi adotado a mesma forma construtiva e as mesmas características do MEF da estrutura de validação, ou seja, as mesmas propriedades mecânicas do material obtidas através dos ensaios do programa de caracterização. Entretanto, para representar a rigidez dos capacitores, também foram utilizadas as mesmas barras cilíndricas utilizadas para os isoladores, além de se adotar carregamentos diferentes, pois neste caso foram considerados as cargas e momentos gerados pela ação do vento em todos os acessórios e nos suportes (área útil da

estrutura), além das cargas e momentos gerados nos barramentos (cabos) pela ação do vento e pelo fenômeno de curto-circuito em 3 (três) casos diferentes.

4.5.5) Aplicação das cargas e momentos no MEF para os três casos de curto-circuito

Para os 3 (três) casos de curto-circuito, nomeados 1, 2 e 3, foram considerados as cargas e momentos referentes aos seguintes acessórios: isolador de 13,8 kV e de 34,5 kV, transformador de corrente (Tab. 4.2); pára-raios e capacitores (Tab. 4.3); cargas de vento atuantes na estrutura (Tab. 4.5 e 4.6), além das cargas de vento e de curto circuito atuantes nos barramentos (Tab. 4.4). O carregamento considerando os esforços de curto-circuito nos barramentos foi o fator que diferenciou os 3 (três) casos simulados para curto-circuito, sendo eles os Casos 1, 2 e 3 respectivamente.

Tabela 4.2 – Cargas e momentos nos isoladores e transformador

<i>Isolador de 13.8 kV</i>				<i>Isolador de 34.5 kV</i>		<i>Transformador de Corrente</i>			
<i>Carga (N)</i>		<i>Momento (N.m)</i>		<i>Carga (N)</i>		<i>Carga (N)</i>		<i>Momento (N.m)</i>	
x	y	x	y	x	y	x	y	x	y
-17,14	17,14	1,29	1,29	-34,56	34,56	-72,4	72,4	-3,62	-3,62

Tabela 4.3 – Cargas e momentos nos pára-raios e capacitores

<i>Pára-raios</i>						<i>Capacitores</i>					
<i>Altura (mm)</i>	<i>Carga (N)</i>		<i>Momento (N.m)</i>			<i>Altura (mm)</i>	<i>Carga (N)</i>			<i>Momento (N.m)</i>	
	x	Y	x	y	z		x	y	z	x	y
3705	-23,16	23,16	-11,04	-3,13	5,21	3615	-44,42	13,07	-268,14	-2,29	-7,77
4260	-23,7	23,7	-11,04	-3,2	5,33	4065	-45,30	13,32	-268,14	-2,33	-7,93
4815	-24,19	24,19	-11,04	-3,27	5,44	4560	-47,18	13,58	-268,14	-2,38	-8,14

Tabela 4.4 – Cargas de vento e de curto-circuito nos barramentos para os 3 (três) casos

<i>Casos</i>	<i>Caso 1</i>			<i>Caso 2</i>			<i>Caso 3</i>		
	<i>Fase A</i>	<i>Fase B</i>	<i>Fase C</i>	<i>Fase A</i>	<i>Fase B</i>	<i>Fase C</i>	<i>Fase A</i>	<i>Fase B</i>	<i>Fase C</i>
<i>Esforços</i>									
<i>Carga (N)</i>	119,02	-48,98	-216,98	-48,98	287,02	-384,98	287,02	-384,98	-48,98
<i>Momento (N.m)</i>	46,22	-9,22	-64,66	-9,22	101,66	-120,1	101,66	-120,1	-9,22

Dessa forma, estabeleceu-se:

- cargas e momentos relativos aos capacitores: nós 17, 20, 23, 45, 46, 47, 48, 51, 52, 53, 54, 57, 58, 59, 60, 63, 64, 67, 68, 69, 70, 76, 77, 78, 79, 82 e 85;
- cargas e momentos relativos aos barramentos: nós 89, 10 e 87;
- cargas relativas ao transformador de corrente: nós 92, 95, 96 e 94;
- cargas e momentos relativos aos pára-raios e isoladores de 13,8 kV: 90, 91 e 92;
- cargas relativas aos isoladores de 34,5 kV: 40, 41, 140 e 141;
- cargas de vento atuantes na estrutura: a aplicação no MEF levou em consideração as magnitudes das áreas constituintes de cada face (Fig. 4.9-a). Desse modo, as cargas de vento foram distribuídas nos pontos (Fig. 4.9-b) obedecendo à proporção relativa a cada área em relação à área total. As Tabelas 4.5 e 4.6 apresentam os valores atribuídos a cada ponto.

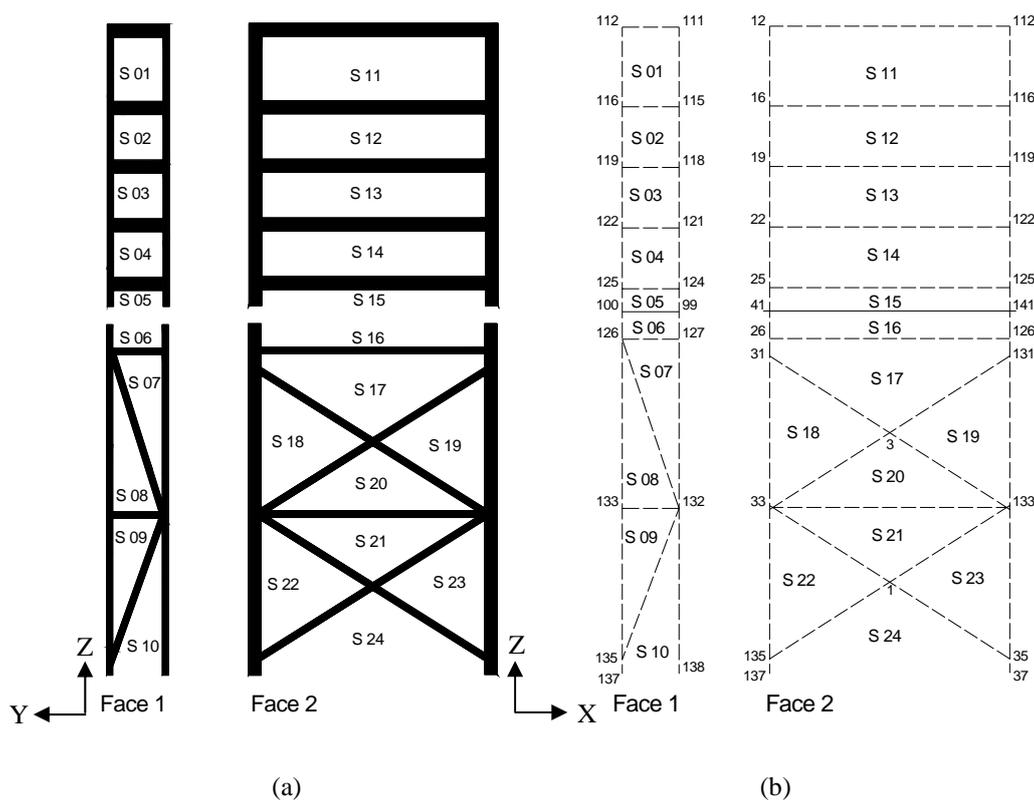


Figura 4.9 – (a) Áreas constituintes das faces do Banco de Capacitores; (b) Pontos de aplicação da força de vento nas faces do Banco de Capacitores

As cargas calculadas (Apêndice B) e apresentadas nas Tabelas 4.2, 4.3 e 4.4 para os três casos de curto-circuito, obedeceu uma distribuição ao longo da estrutura, de forma a simular a situação real. Como exemplo, o Caso 1 é apresentado na Figura 4.10.

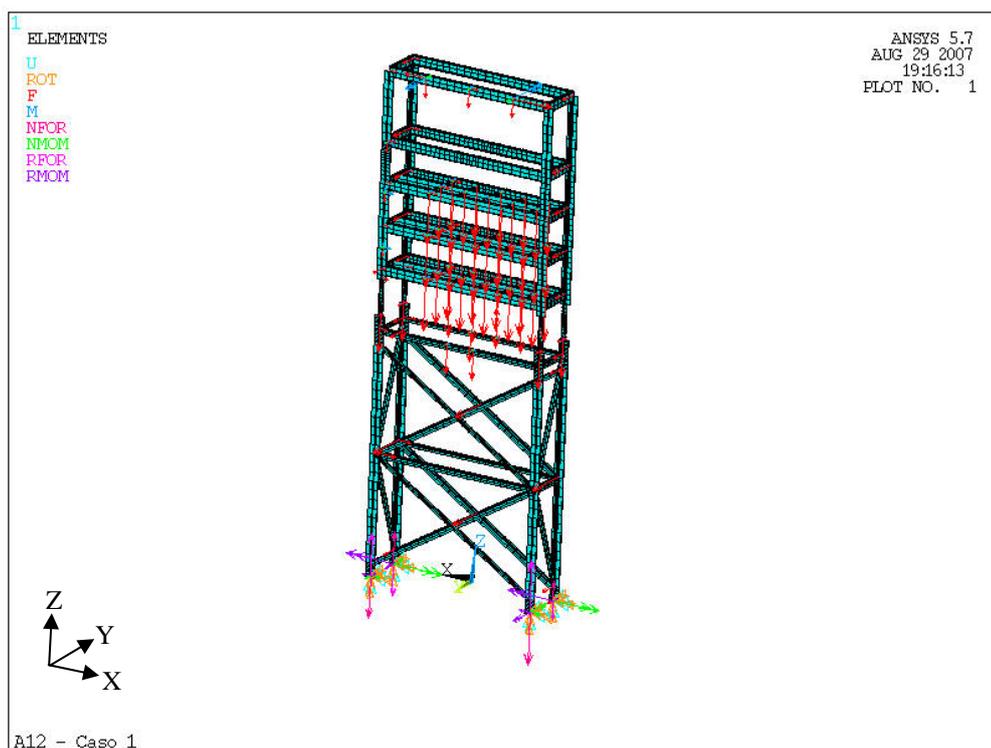


Figura 4.10 - Pontos de aplicação de cargas para o Caso 1 de curto-circuito

Além das cargas referentes aos acessórios, a carga máxima de vento calculada (3127,38 N) foi distribuída ao longo dos suportes da estrutura conforme apresentado nas Tabelas 4.5 e 4.6, de forma também a simular a situação real.

A distribuição da carga de vento apresentada nas Tabelas 4.5 e 4.6, adotou a nomenclatura das áreas mostradas na Figura 4.9.

Tabela 4.5 – Distribuição da carga de vento na face 1 do Banco de Capacitores

<i>Pontos</i>	<i>Área</i>	<i>(%)</i>	<i>Força</i>	<i>Np</i>	<i>F / np</i>	<i>Total F (N)</i>
111 / 112	S 01	20,36	154,02	4	-38,51	-38,51
115 / 116	S 01	20,36	-154,02	4	-38,51	-52,10
	S 02	7,19	-54,36	4	-13,59	
118 / 119	S 02	7,19	-54,36	4	-13,59	-27,18
	S 03	7,19	-54,36	4	-13,59	
121 / 122	S 03	7,19	-54,36	4	-13,59	-24,92
	S 04	5,99	-45,30	4	-11,33	
124 / 125	S 04	5,99	-45,30	4	-11,33	-20,39
	S 05	4,79	-36,24	4	-9,06	
99 / 100	S 05	4,79	-36,24	4	-9,06	-16,99
	S 06	4,19	-31,71	4	-7,93	
127	S 06	4,19	-31,71	4	-7,93	-39,64
	S 07	12,57	-95,13	3	-31,71	
126	S 06	4,19	-31,71	4	-7,93	-71,35
	S 07	12,57	-95,13	3	-31,71	
	S 08	12,57	-95,13	3	-31,71	
	S 07	12,57	-95,13	3	-31,71	
132	S 08	12,57	-95,13	3	-31,71	-117,78
	S 09	10,78	-81,54	3	-27,18	
133	S 10	14,37	-108,72	4	-27,18	-58,89
	S 08	12,57	-95,13	3	-31,71	
135	S 09	10,78	-81,54	3	-27,18	-54,36
	S 10	14,37	-108,72	4	-27,18	
137	S 09	10,78	-81,54	3	-27,18	-27,18
138	S 10	14,37	-108,72	4	-27,18	-27,18

Tabela 4.6 – Distribuição da carga de vento na face 2 do Banco de Capacitores

<i>Pontos</i>	<i>Área</i>	<i>(%)</i>	<i>Força</i>	<i>Np</i>	<i>F / np</i>	<i>Total F (N)</i>
12 / 112	S 11	12,2	370,17	4	92,54	92,54
16 / 116	S 11	12,2	370,17	4	92,54	157,78
	S 12	8,6	260,94	4	65,24	
19 / 119	S 12	8,6	260,94	4	65,24	130,48
	S 13	8,6	260,94	4	65,24	
22 / 122	S 13	8,6	260,94	4	65,24	130,48
	S 14	8,6	260,94	4	65,24	
25 / 125	S 14	8,6	260,94	4	65,24	88,00
	S 15	3,0	91,03	4	22,76	
41 / 141	S 15	3,0	91,03	4	22,76	56,89
	S 16	4,5	136,54	4	34,13	
26 / 126	S 16	4,5	136,54	4	34,13	90,57
	S 17	9,3	282,18	5	56,44	
31	S 17	9,3	282,18	5	56,44	117,12
	S 18	6,0	182,05	3	60,68	
131	S 17	9,3	282,18	5	56,44	117,12
	S 18	6,0	182,05	3	60,68	
3	S 17	9,3	282,18	5	56,44	236,46
	S 18	6,0	182,05	3	60,68	
33	S 19	6,0	182,05	3	60,68	238,68
	S 20	5,8	175,98	3	58,66	
133	S 18	6,0	182,05	3	60,68	238,68
	S 20	5,8	175,98	3	58,66	
133	S 19	6,0	182,05	3	60,68	238,68
	S 21	5,8	175,98	3	58,66	
	S 23	6,0	182,05	3	60,68	

Tabela 4.6 – Distribuição da carga de vento na face 2 do Banco de Capacitores

(Continuação)

	S 21	5,8	175,98	3	58,66	
1	S 22	6,0	182,05	3	60,68	236,46
	S 23	6,0	182,05	3	60,68	
	S 24	9,3	282,18	5	56,44	
35	S 22	6,0	182,05	3	60,68	117,12
	S 24	9,3	282,18	5	56,44	
135	S 23	6,0	182,05	3	60,68	117,12
	S 24	9,3	282,18	5	56,44	
37	S 24	9,3	282,18	5	56,44	56,44
137	S 24	9,3	282,18	5	56,44	56,44

4.6) Ensaio para a validação do Modelo de Elementos Finitos do Banco de Capacitores

4.6.1) Montagem da Estrutura de Validação em material pultrudado

Para a montagem da Estrutura de Validação utilizou-se de perfis pultrudados padrão WPP (Figs. 4.5-a, 4.5-b, 4.5-c) e como elemento de fixação parafusos, porcas e arruelas.

Inicialmente, foram montadas as duas partes constituintes da Estrutura de Validação realizando a união dos perfis. Posteriormente, o módulo inferior foi locado na fundação e em seguida, através de um sistema hidráulico de elevação (Fig. 4.11-a), o módulo superior foi posicionado sobre o módulo inferior. Entre os módulos constata-se a existência de isoladores de 34,5 kV realizando a função de elemento de união entre eles (Fig. 4.11-b).



(a)



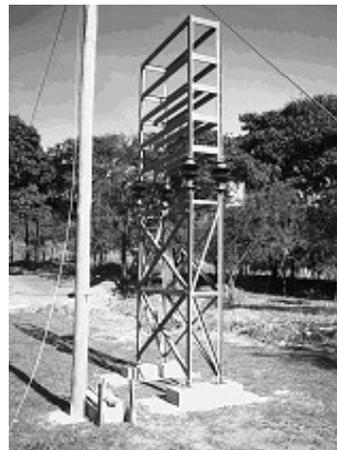
(b)

Figura 4.11 – (a) Elevação do módulo superior da Estrutura de Validação; (b) Fixação de um isolador entre os módulos

As Figuras 4.12-a e 4.12-b ilustram Estrutura de Validação montada no Campus da Universidade Federal de Minas Gerais (UFMG).



(a)



(b)

Figura 4.12 – (a) Vista frontal da Estrutura de Validação; (b) Vista em perspectiva da Estrutura de Validação

Para a elevação dos capacitores, foi improvisado um sistema amarrado ao módulo superior da estrutura (Fig. 4.13-a). Ao término do processo de elevação, a Estrutura de Validação configurou-se na forma apresentada na Figura 4.13-b.

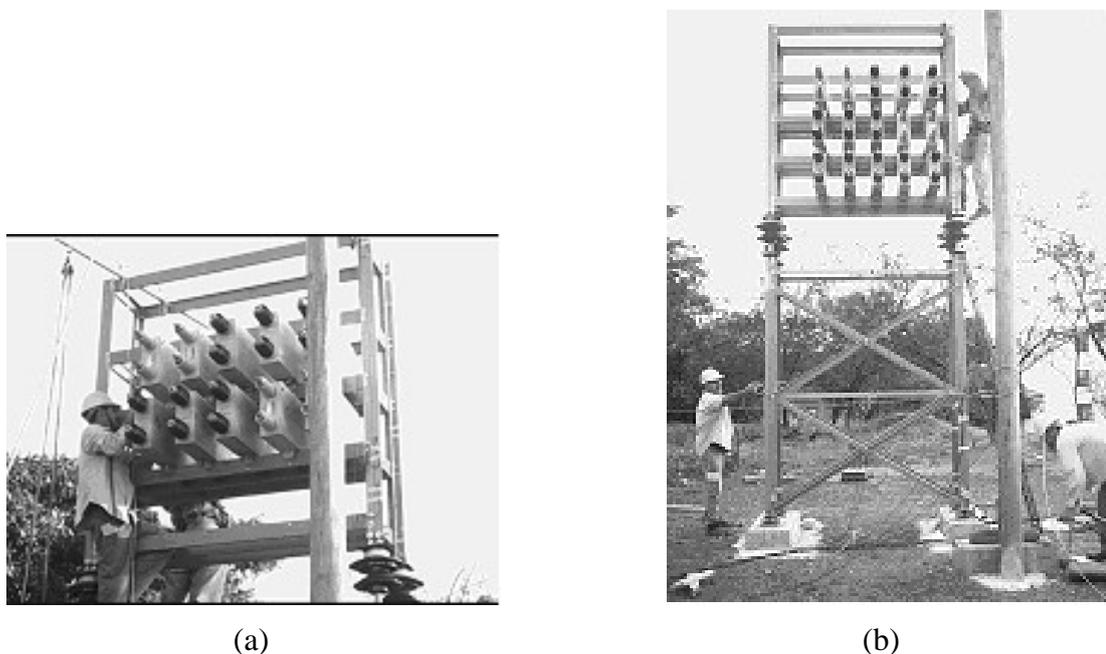


Figura 4.13 – (a) Sistema de elevação dos capacitores; (b) Configuração final da Estrutura de Validação montada com os capacitores

Oito pontos críticos da estrutura (Fig. 4.14) foram selecionados para serem instrumentados e monitorados com *Strain Gauges*, segundo resultados de análises preliminares de elementos finitos. Os *Strain Gauges* foram colados na direção longitudinal das barras (Fig. 4.15-a), de modo a se estudar os efeitos de tração e compressão na Estrutura de Validação.

Os *Strain Gauges* foram colados longitudinalmente no meio de uma aba do perfil L (25,4 mm = 1" da borda) conforme mostrado na Figura 4.15. Os *Strain Gauges* 1, 2, 3 e 4 foram posicionados no módulo superior da estrutura enquanto os *Strain Gauges* 5, 6, 7 e 8 foram posicionados no módulo inferior, todos eles em pontos de alta concentração de deformação.

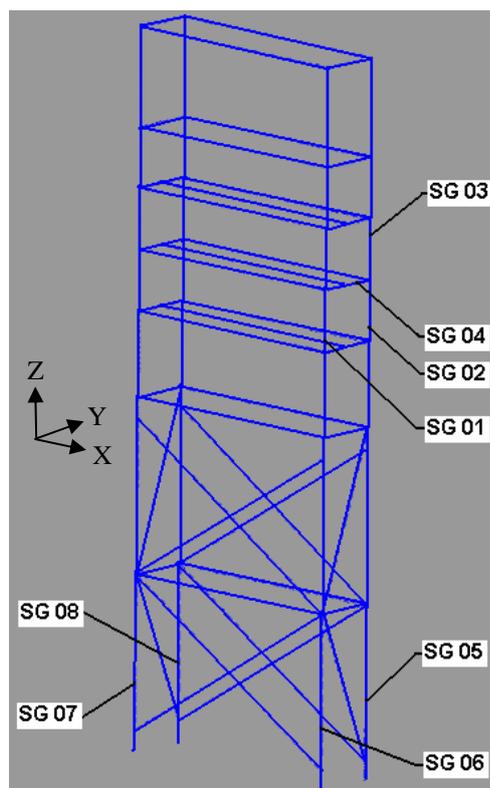
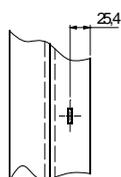


Figura 4.14 – Pontos de maior deformação para o modelo de validação do ensaio

As ligações dos *Strain Gauges* foram executadas através de 4 (quatro) fios eliminando, assim, efeitos de aumento de resistência relativos aos comprimentos dos cabos (Fig 4.15-b).



(a)



(b)

Figura 4.15 – (a) Posicionamento do Strain Gauge; (b) Ligação de um *Strain Gauge*

Para a realização do ensaio, uma força de vento equivalente foi aplicada no topo da estrutura através de um sistema de roldana, conectada a um poste adjacente (Fig. 4.16) com um cabo de aço tracionado por uma manivela manual (Tirfor).

O cabo de aço foi conectado à estrutura de modo a formar um ângulo de 14° (ângulo para o qual se obteve o maior valor de força de vento, conforme Apêndice B) com a estrutura, porém o atrito entre o cabo de aço e a roldana foi desprezado.

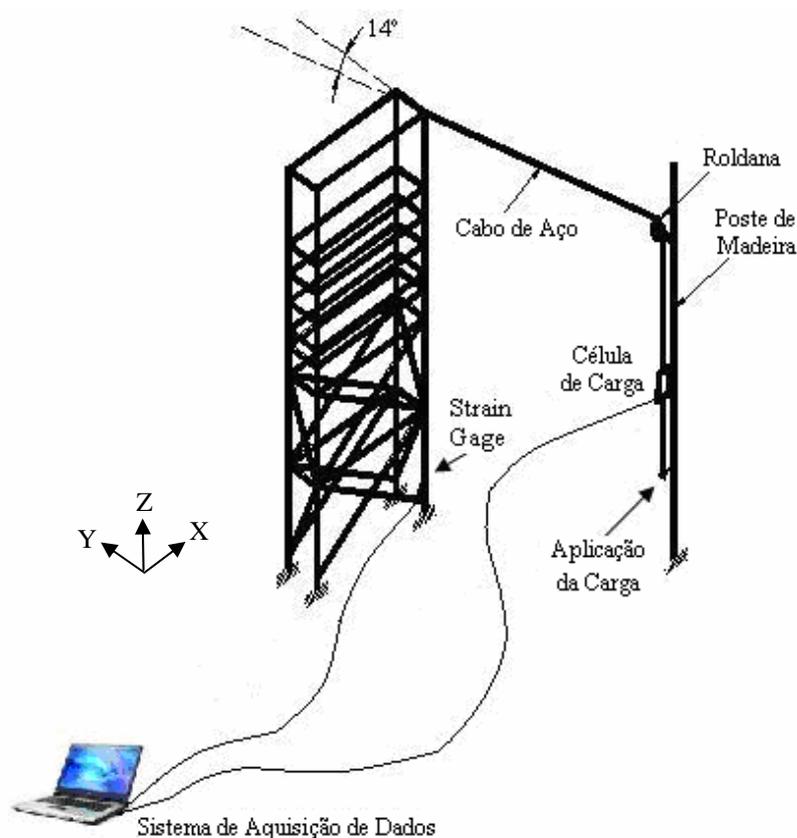


Figura 4.16 – Esquema da montagem do ensaio da Estrutura de Validação

Uma célula de carga foi conectada ao sistema para medir a força aplicada. A célula de carga com capacidade de 1000 kgf e os *Strain Gauges* foram conectados ao PC com um sistema de aquisição de dados mostrado na Figura 4.16 (*Agilent Technologies 34970A*, precisão de 0,004% e resolução de $6\frac{1}{2}$ dígitos). Durante o ensaio, a força foi continuamente aplicada com o sistema de aquisição de dados gravando os sinais sincronizados da célula de carga e dos *Strain Gauges*.

CAPÍTULO 5

Resultados e Discussão

5.1) Resultados Obtidos para a Caracterização do Material Pultrudado

Foram tiradas medidas das dimensões dos corpos de prova das amostras do material pultrudado, e cada amostra foi medida em 5 (cinco) pontos diferentes na largura e espessura. Através dessas medidas foram encontradas as médias onde se calculou a área da seção de cada amostra, tanto das longitudinais quanto das transversais (Tabs. 5.1 e 5.2).

Tabela 5.1 – Área da seção transversal dos CDPs longitudinais

<i>CDPL</i>	<i>Área (mm²)</i>
1L	84,38
2L	85,65
3L	84,37
4L	84,77
5L	80,76
6L	80,58

Tabela 5.2 – Área da seção transversal dos CDPs transversais

<i>CDPT</i>	<i>Área (mm²)</i>
1T	153,66
2T	157,50
3T	157,70
4T	154,40
5T	156,89
6T	156,00

As Figuras 5.1 e 5.2 mostram duas amostras de corpos de prova após realização dos ensaios de tração para caracterização do material, sendo elas longitudinal e transversal respectivamente.



Figura 5.1 – CDP longitudinal após ensaio de tração



Figura 5.2 – CDP transversal após ensaio de tração

As áreas constantes das tabelas 5.1 e 5.2, foram então utilizadas no cálculo das tensões que serão apresentadas nos gráficos a seguir (Figs. 5.3 a 5.8), gráficos estes resultantes dos ensaios das amostras longitudinais do material pultrudado, e (Figs. 5.9 a 5.14) resultantes dos ensaios das amostras transversais, sendo que as ordenadas apresentam os valores de deformações calculadas em função da leitura dos *Strain Gauges* e as abscissas apresentam os valores das tensões calculadas em função da carga aplicada de forma gradativa.

As Figuras 5.3 a 5.8 apresentadas abaixo são resultantes dos ensaios das amostras transversais (SG2).

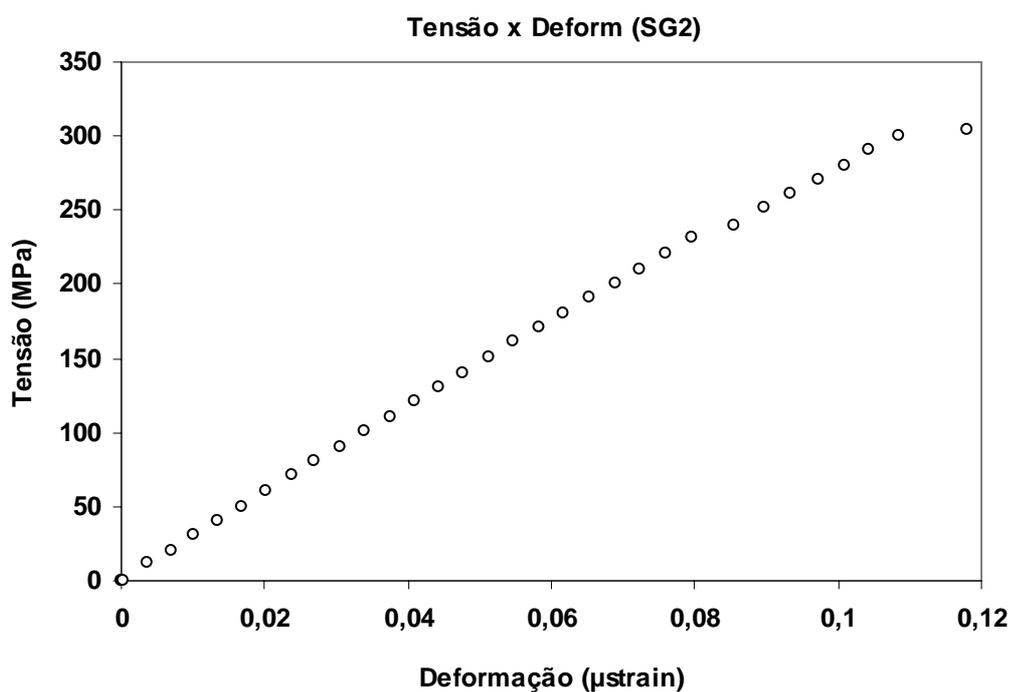


Figura 5.3 – Gráfico resultante do ensaio do corpo de prova 1L (SG2)

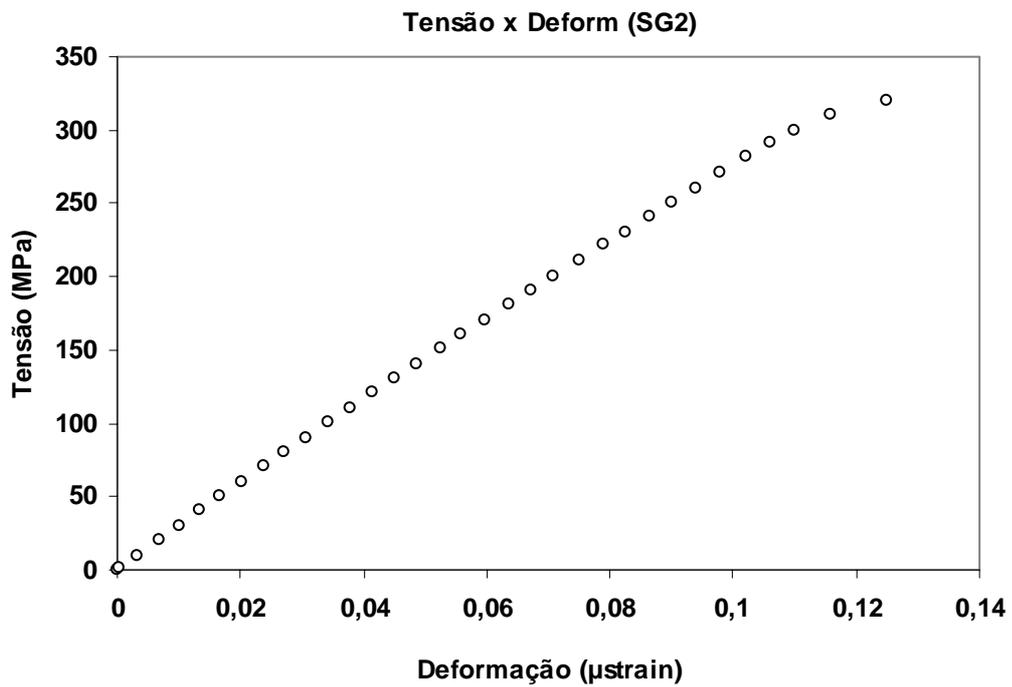


Figura 5.4 – Gráfico resultante do ensaio do corpo de prova 2L (SG2)

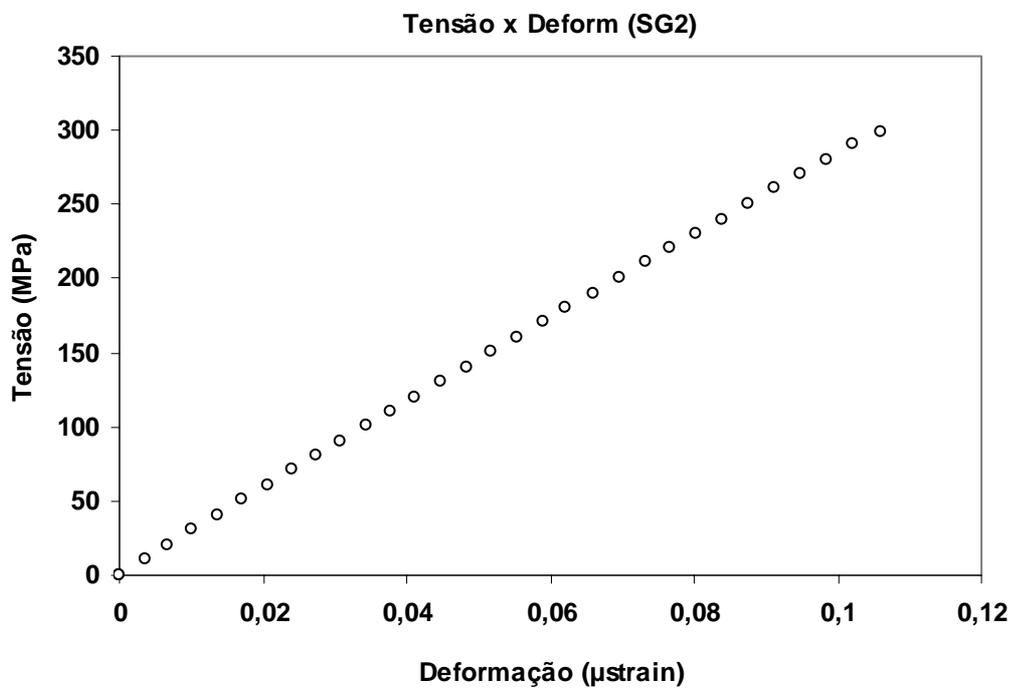


Figura 5.5 – Gráfico resultante do ensaio do corpo de prova 3L (SG2)

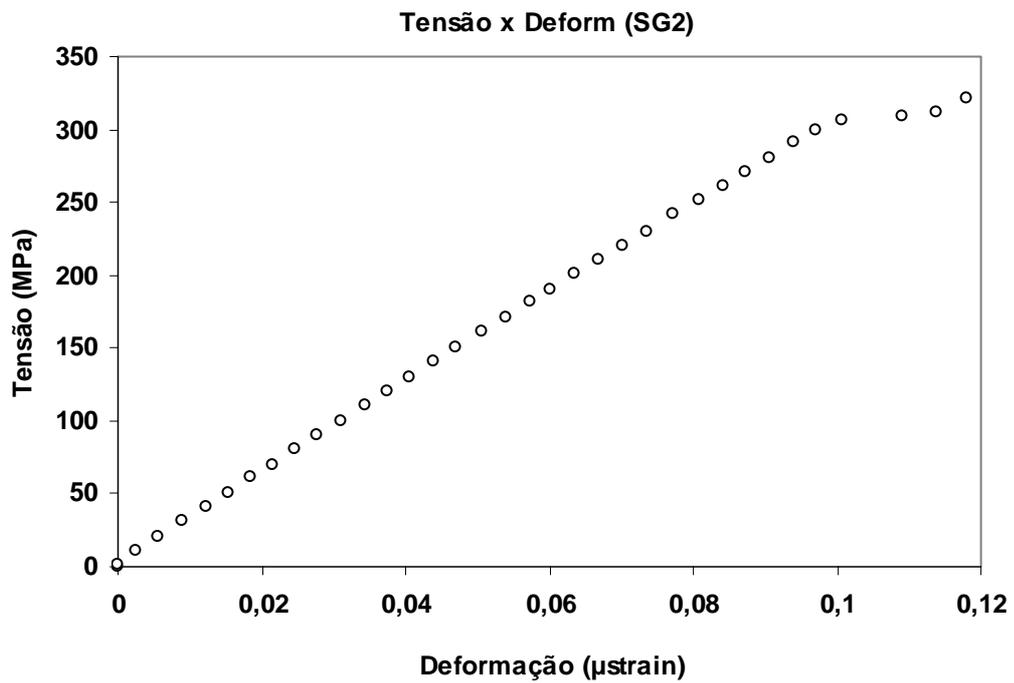


Figura 5.6 – Gráfico resultante do ensaio do corpo de prova 4L (SG2)

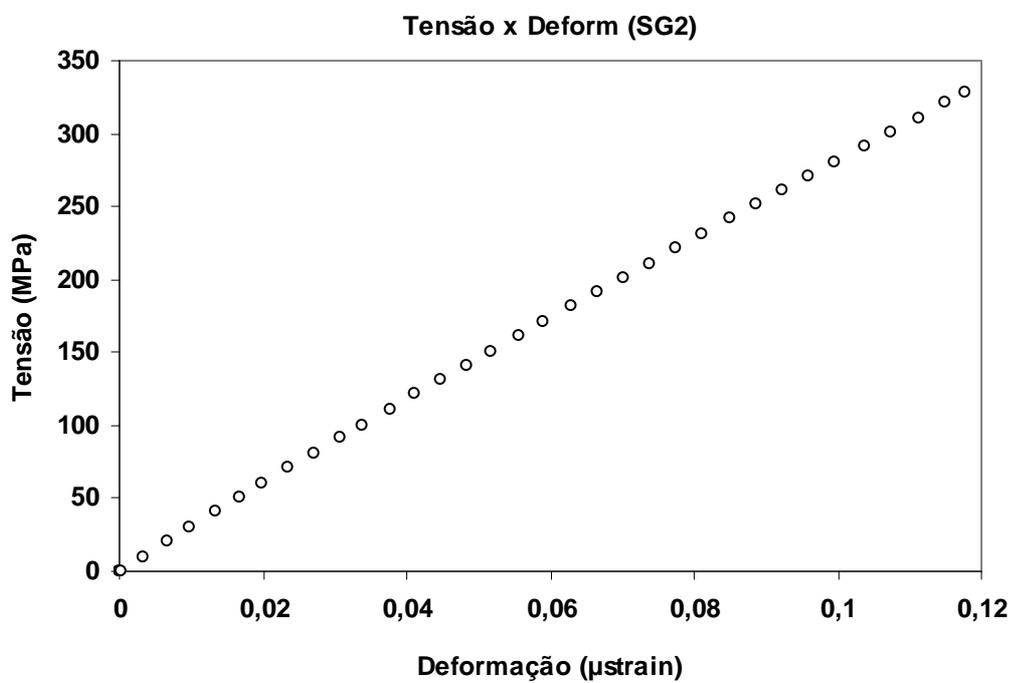


Figura 5.7 – Gráfico resultante do ensaio do corpo de prova 5L (SG2)

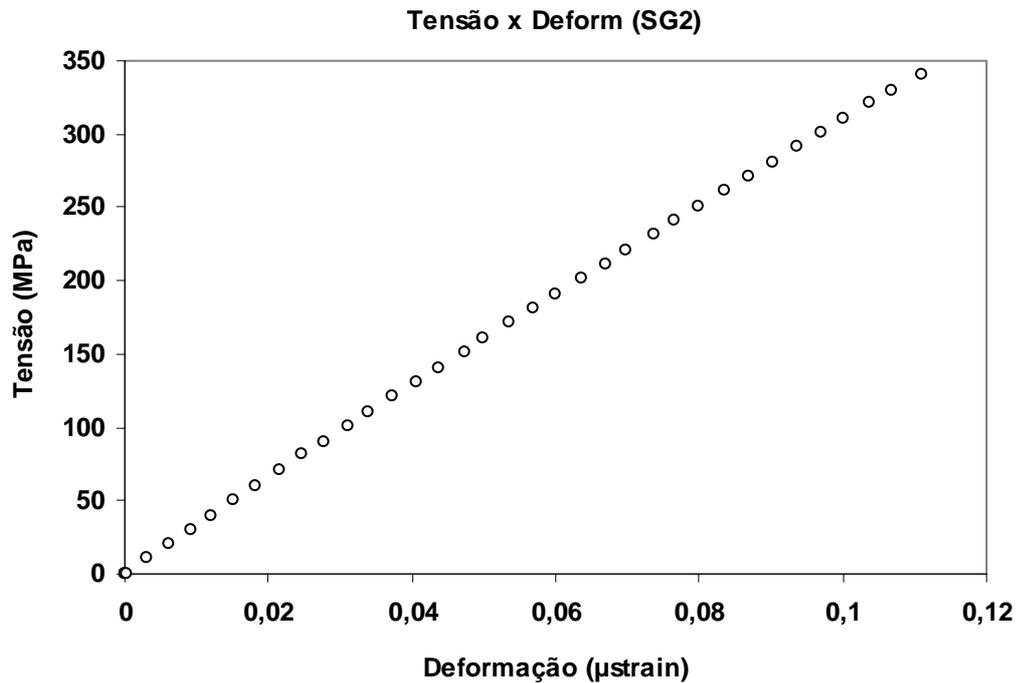


Figura 5.8 – Gráfico resultante do ensaio do corpo de prova 6L (SG2)

De posse das curvas do ensaio de caracterização do material pultrudado para as amostras longitudinais, arbitrou-se, então, 2 (dois) pontos da porção linear das respectivas curvas tornando-se possível determinar o valor do Módulo de Elasticidade Longitudinal (E_I) do material citado.

Para a obtenção de E_I utilizou-se (Eq. 5.1):

$$E_I = \frac{\Delta\sigma}{\Delta\varepsilon} \quad (5.1)$$

onde:

$\Delta\sigma$: variação de carga em uma porção linear da curva de ensaio (SG2);

$\Delta\varepsilon$: variação de deformação em uma porção linear da curva de ensaio (SG2).

Tabela 5.3 – Resultados do cálculo do Módulo de Elasticidade Longitudinal

CDPs	SG2_Longitudinal (E_1)				
	Tensão_pto 1 (MPa)	Tensão_pto 2 (MPa)	Deform_pto 1 (*1e-7)	Deform_pto2 (*1e-7)	E_1 (GPa)
1L	78,67	164,35	26.413,20	56.040,96	28,92
2L	48,40	153,46	16.254,05	53.602,44	28,13
3L	87,22	192,94	29.726,41	66.799,54	28,52
4L	85,37	175,61	26.158,48	55.437,94	30,82
5L	34,75	127,19	11.433,99	43.374,93	28,94
6L	73,14	129,93	22.393,63	40.211,50	31,87
E_1 médio (GPa)					29,53
Desvio Padrão (GPa)					1,47
%					4,99

As Figuras 5.9 a 5.14 apresentadas abaixo são resultantes dos ensaios das amostras transversais (SG2).

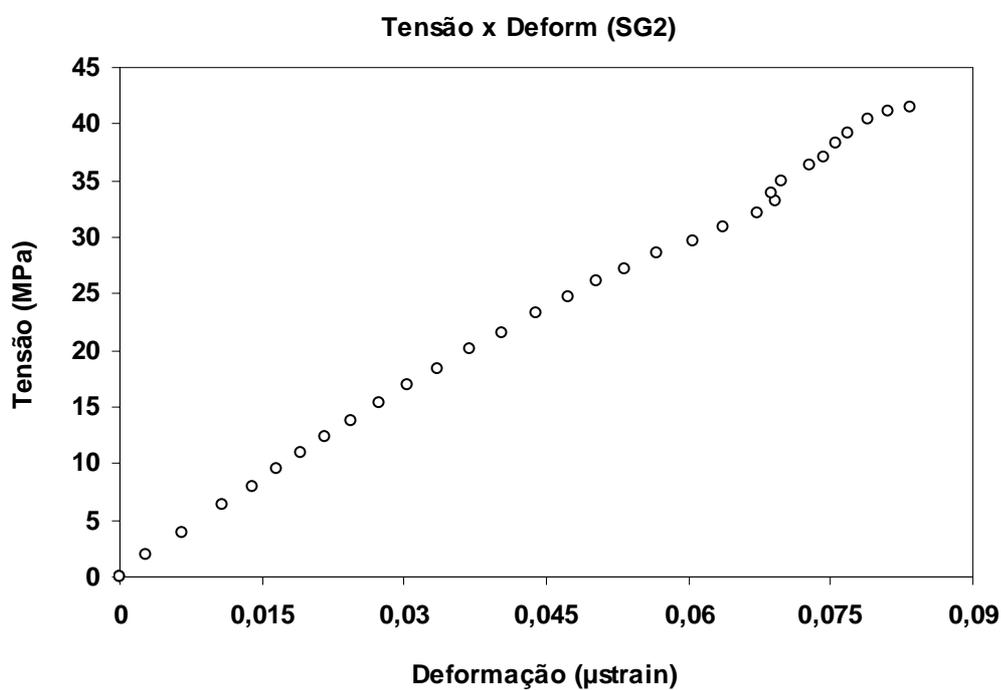


Figura 5.9 – Gráfico resultante do ensaio do corpo de prova 1T (SG2)

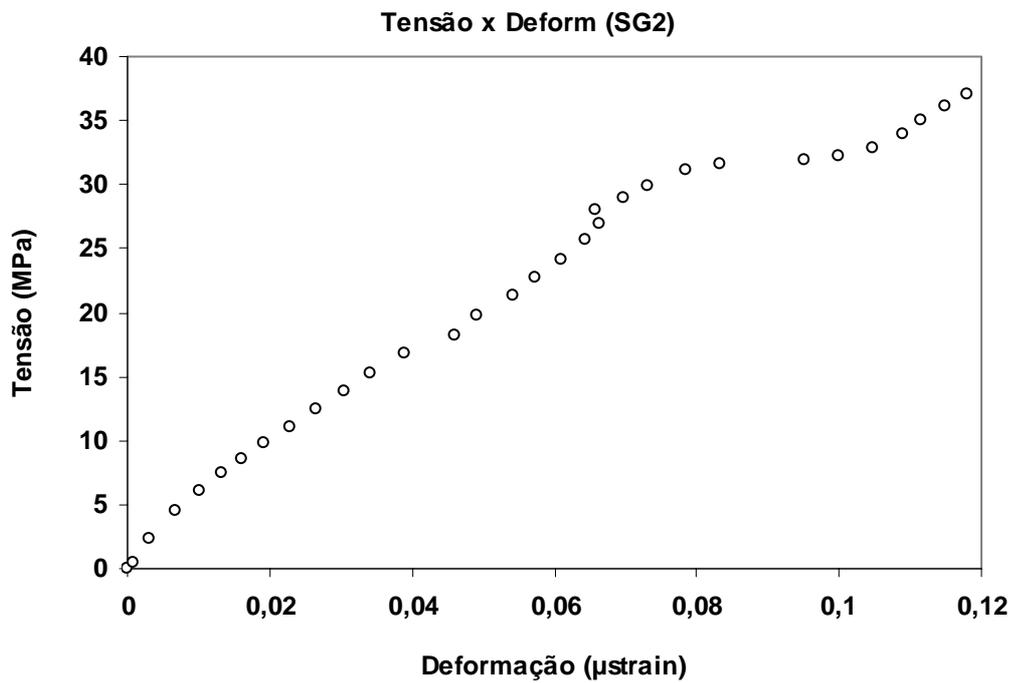


Figura 5.10 – Gráfico resultante do ensaio do corpo de prova 2T (SG2)

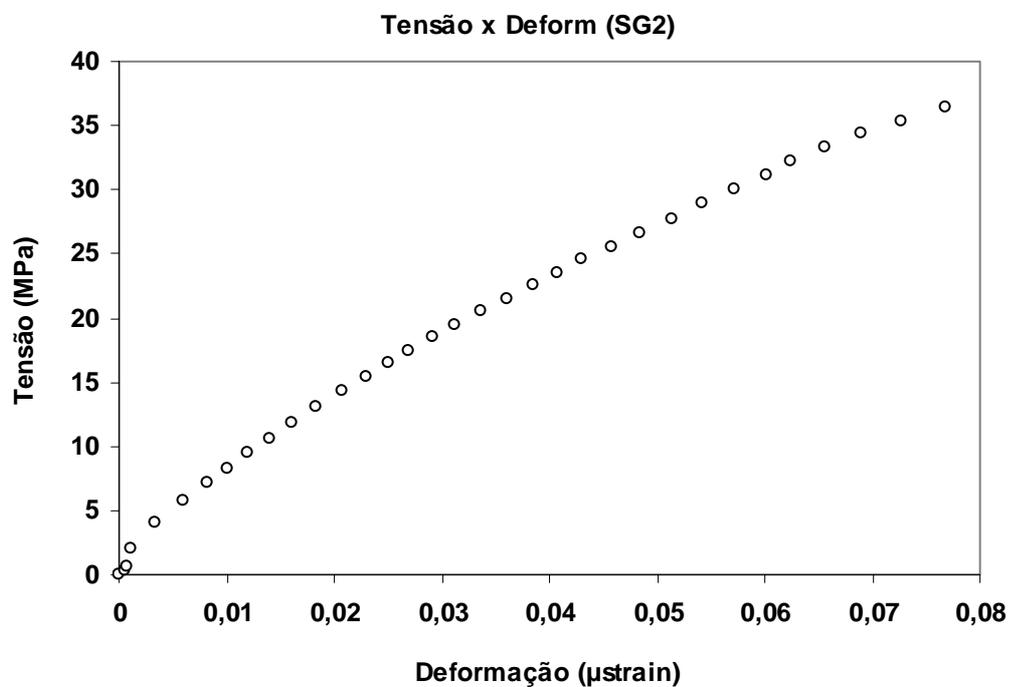


Figura 5.11 – Gráfico resultante do ensaio do corpo de prova 3T (SG2)

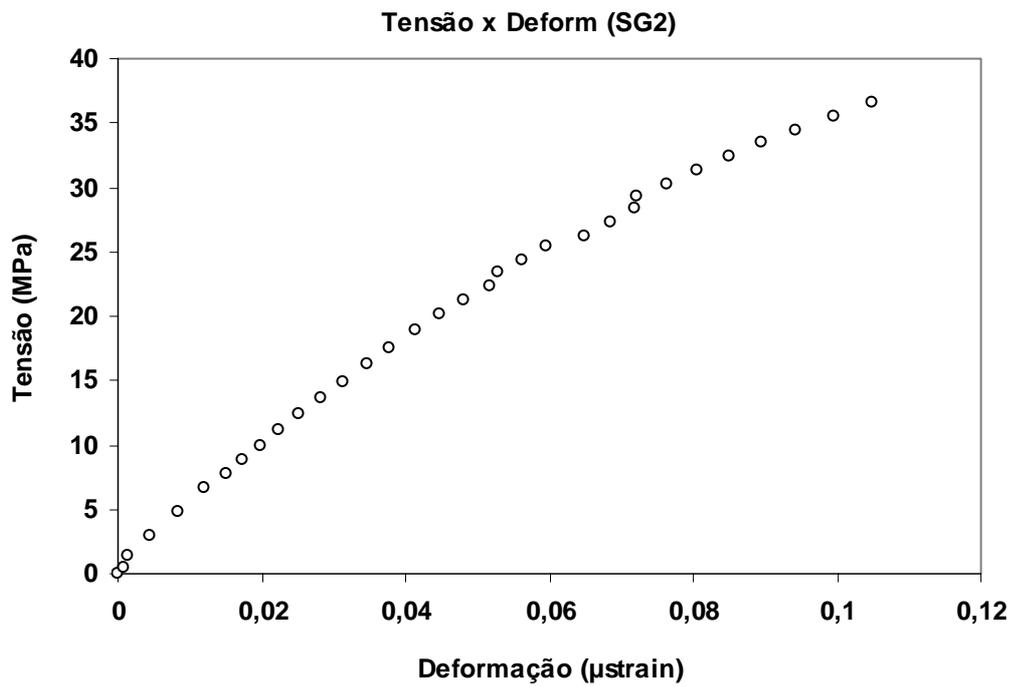


Figura 5.12 – Gráfico resultante do ensaio do corpo de prova 4T (SG2)

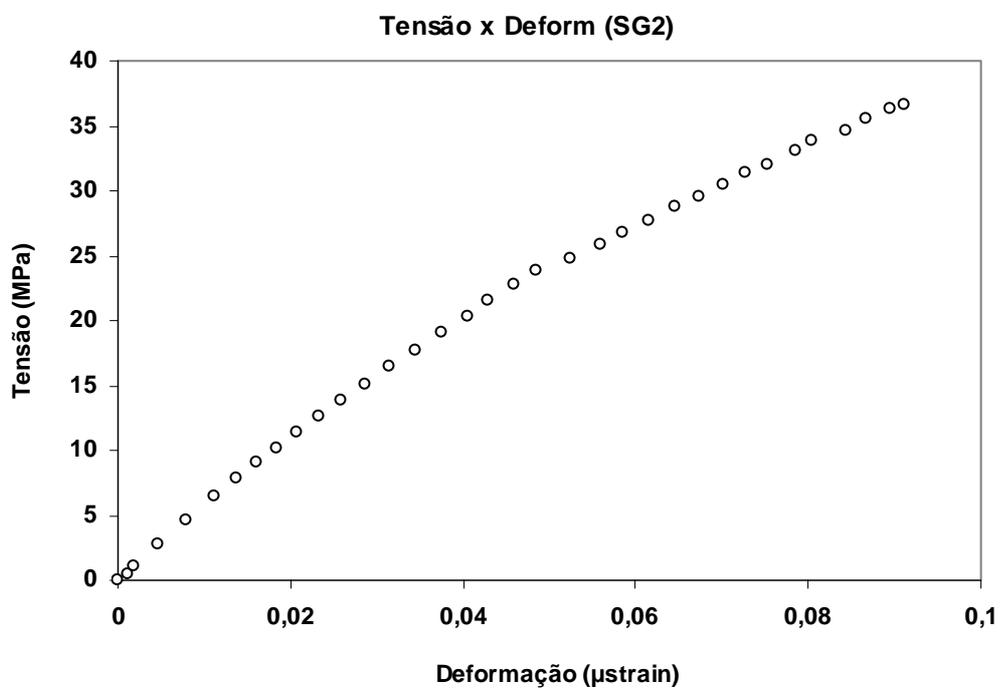


Figura 5.13 – Gráfico resultante do ensaio do corpo de prova 5T (SG2)

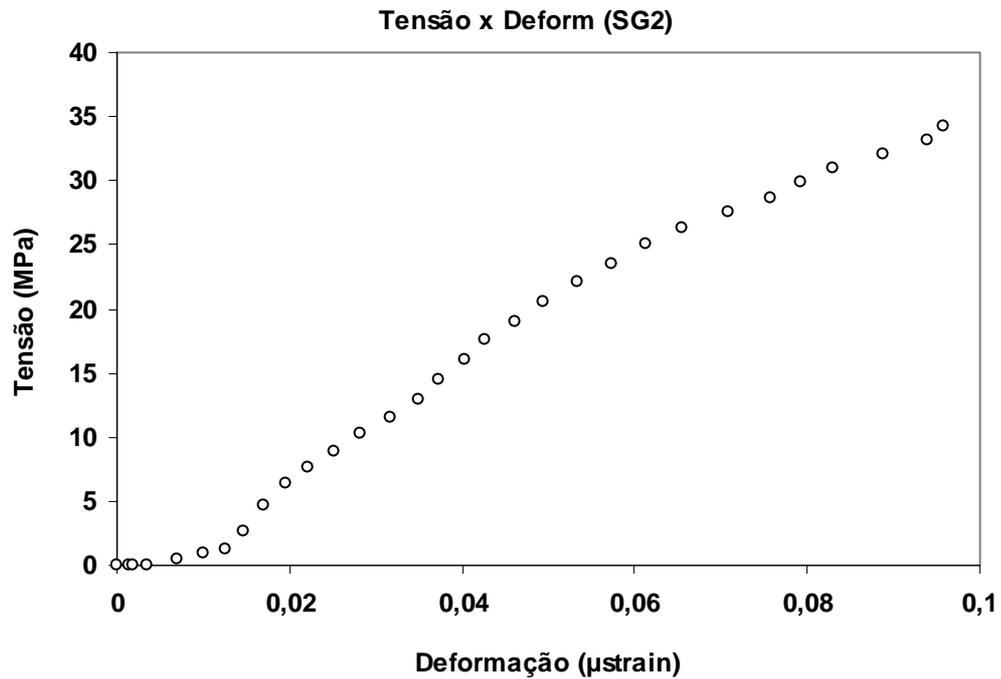


Figura 5.14 – Gráfico resultante do ensaio do corpo de prova 6T (SG2)

De posse das curvas do ensaio de caracterização do material pultrudado para as amostras transversais, arbitrou-se, então, 2 (dois) pontos da porção linear das respectivas curvas tornando-se possível determinar o valor do Módulo de Elasticidade Transversal (E_2) do material citado.

Para a obtenção de E_2 utilizou-se (Eq. 5.2):

$$E_2 = \frac{\Delta\sigma}{\Delta\varepsilon} \tag{5.2}$$

onde:

$\Delta\sigma$: variação de carga em uma porção linear da curva de ensaio (SG2);

$\Delta\varepsilon$: variação de deformação em uma porção linear da curva de ensaio (SG2).

Tabela 5.4 – Resultados do cálculo do Módulo de Elasticidade Transversal

CDPs	<i>SG2_Transversal (E₂)</i>				
	<i>Tensão_pto 1 (MPa)</i>	<i>Tensão_pto 2 (MPa)</i>	<i>Deform_pto 1 (*1e-7)</i>	<i>Deform_pto2 (*1e-7)</i>	<i>E₂ (GPa)</i>
1T	15,38	23,34	27.276,53	43.858,33	4,80
2T	6,80	13,87	11.537,04	30.452,13	3,74
3T	24,08	29,44	41.997,58	55.611,27	3,94
4T	8,35	18,22	16.199,37	39.644,59	4,21
5T	5,57	15,82	9.471,74	30.035,34	4,98
6T	9,53	15,24	15.849,65	26.729,56	5,25
<i>E₂ médio (GPa)</i>					<i>4,49</i>
<i>Desvio Padrão (GPa)</i>					<i>0,61</i>
<i>%</i>					<i>13,62</i>

Os gráficos a seguir (Figs. 5.15 a 5.19) apresentam os resultados obtidos nos ensaios das amostras longitudinais do material pultrudado, e (Figs. 5.20 a 5.25) resultantes dos ensaios das amostras transversais. Ambos os gráficos são resultantes da leitura do *Strain Gauge* na direção transversal dos CDPs (SG1).

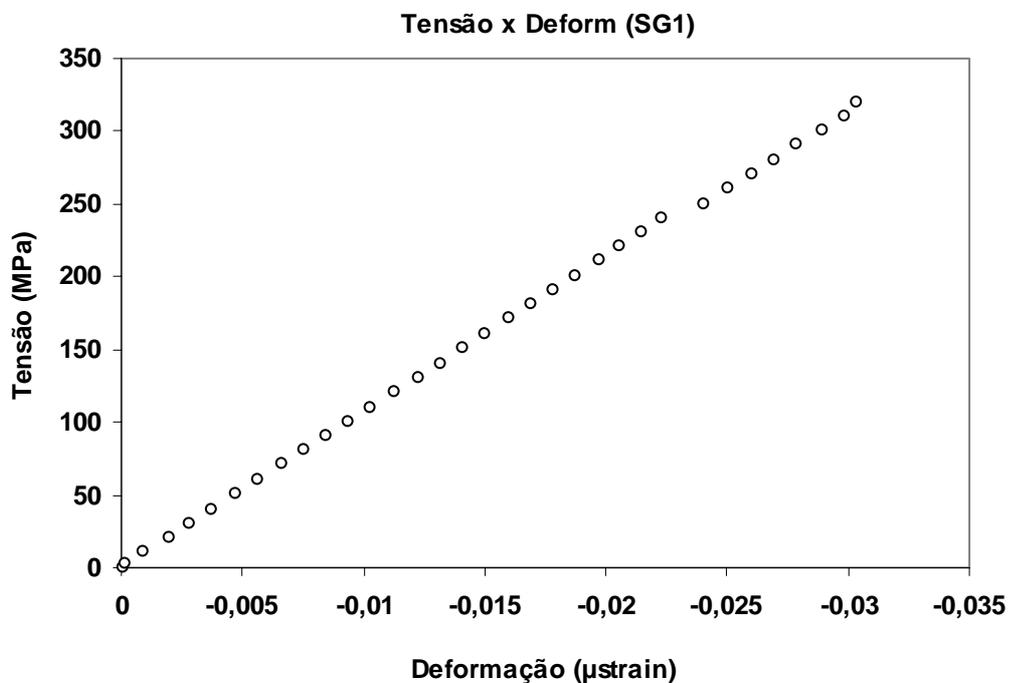


Figura 5.15 – Gráfico resultante do ensaio do corpo de prova 1L (SG1)

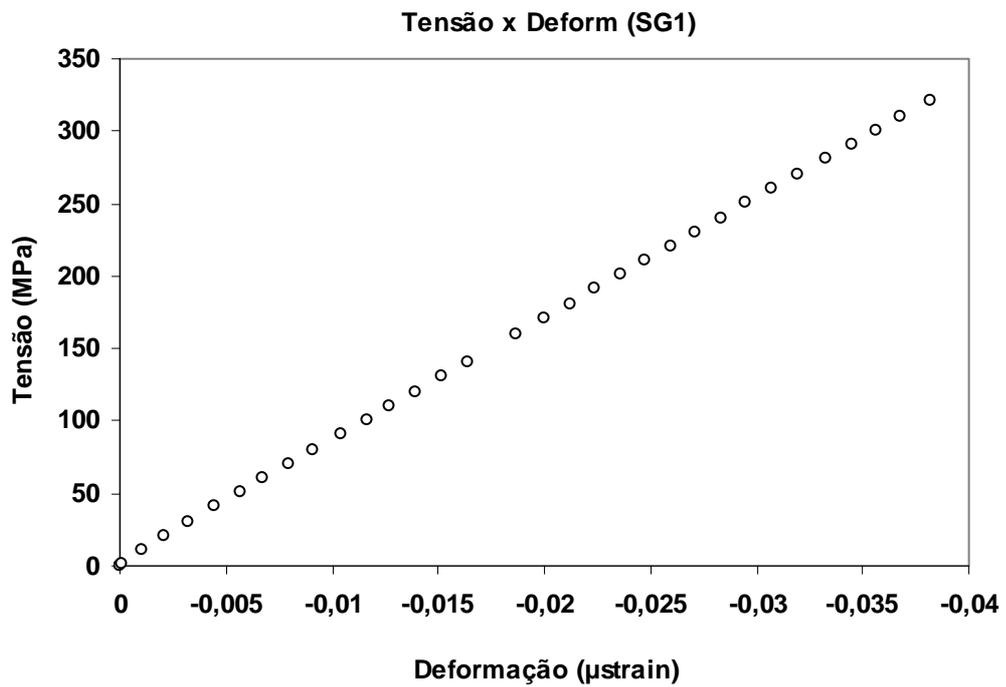


Figura 5.16 – Gráfico resultante do ensaio do corpo de prova 2L (SG1)

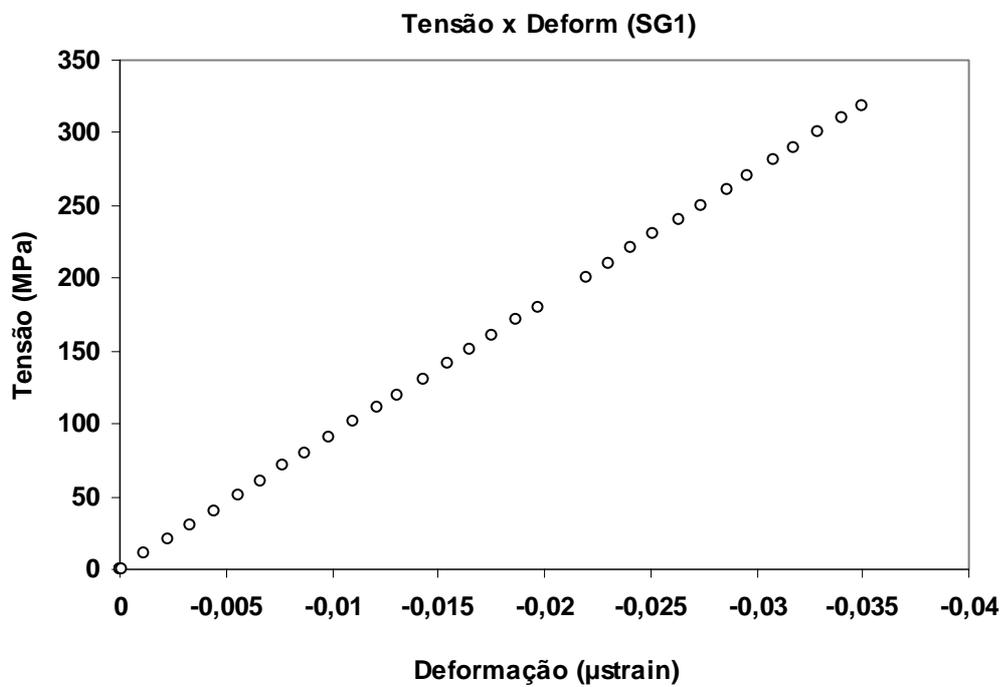


Figura 5.17 – Gráfico resultante do ensaio do corpo de prova 3L (SG1)

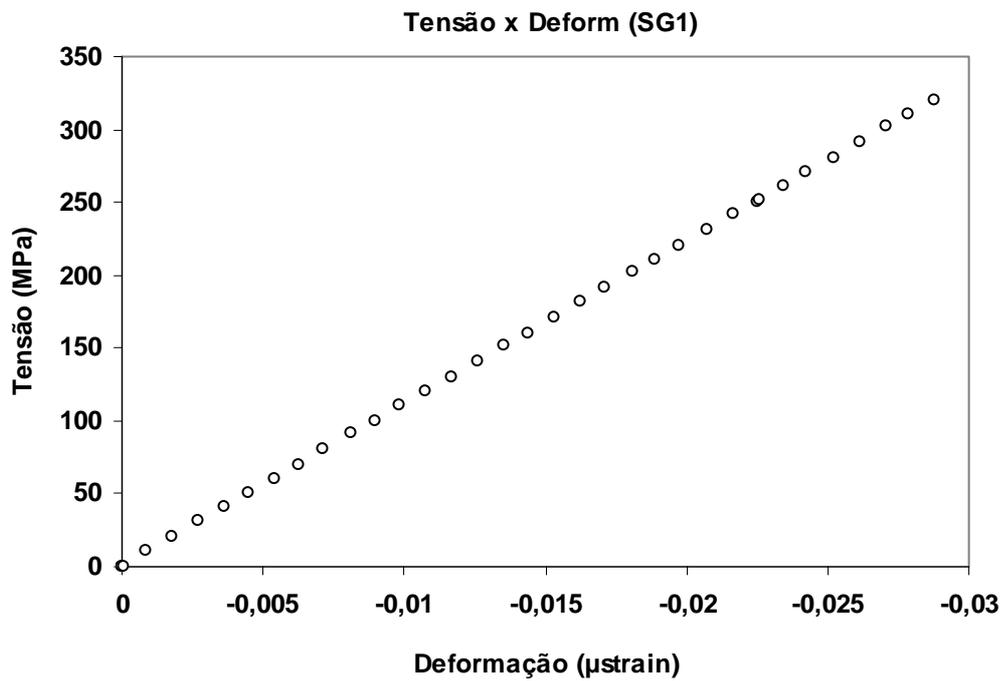


Figura 5.18 – Gráfico resultante do ensaio do corpo de prova 4L (SG1)

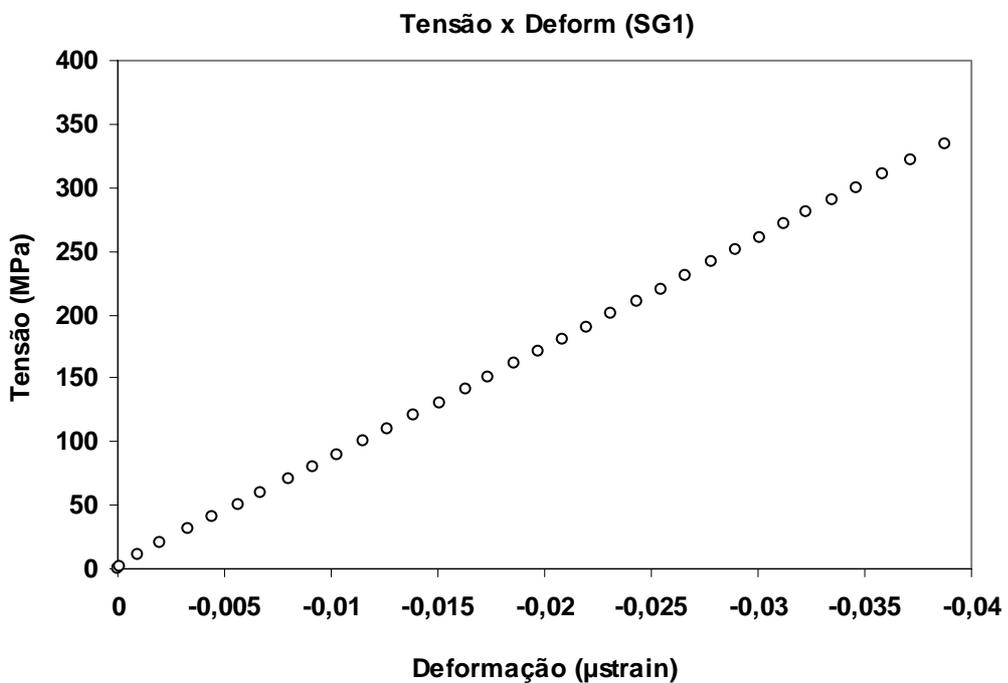


Figura 5.19 – Gráfico resultante do ensaio do corpo de prova 5L (SG1)

Durante a realização do ensaio do CDP 1L houve o descolamento do *Strain Gauge* transversal (SG1), portanto não foi possível a aquisição de dados nessa direção da amostra em questão.

As Figuras 5.20 a 5.25 apresentadas abaixo são resultantes dos ensaios das amostras transversais (SG1).

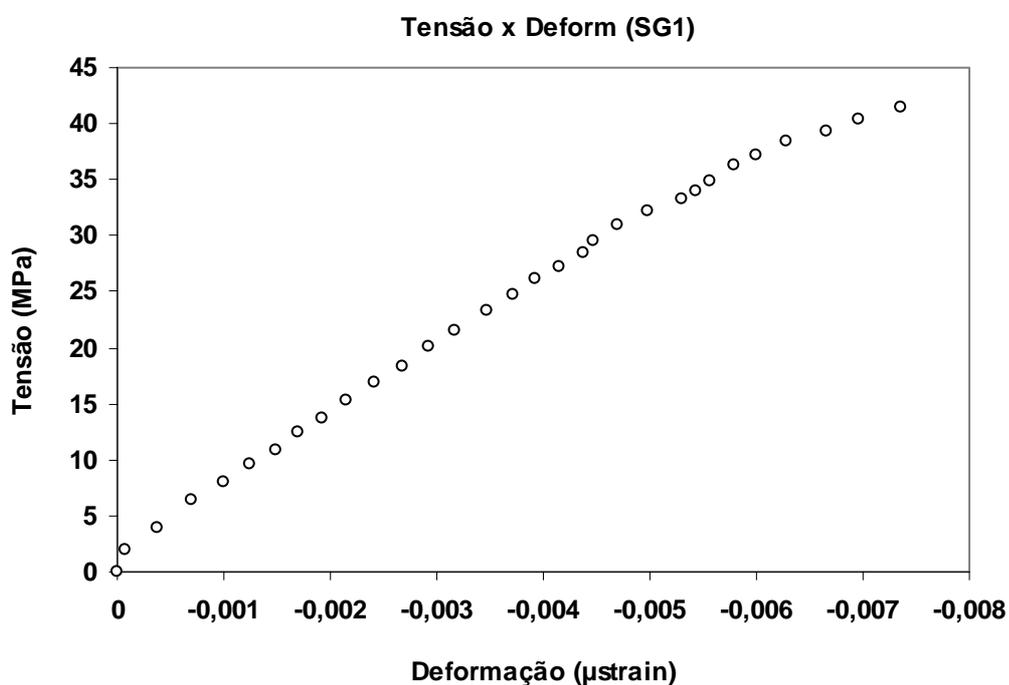


Figura 5.20 – Gráfico resultante do ensaio do corpo de prova 1T (SG1)

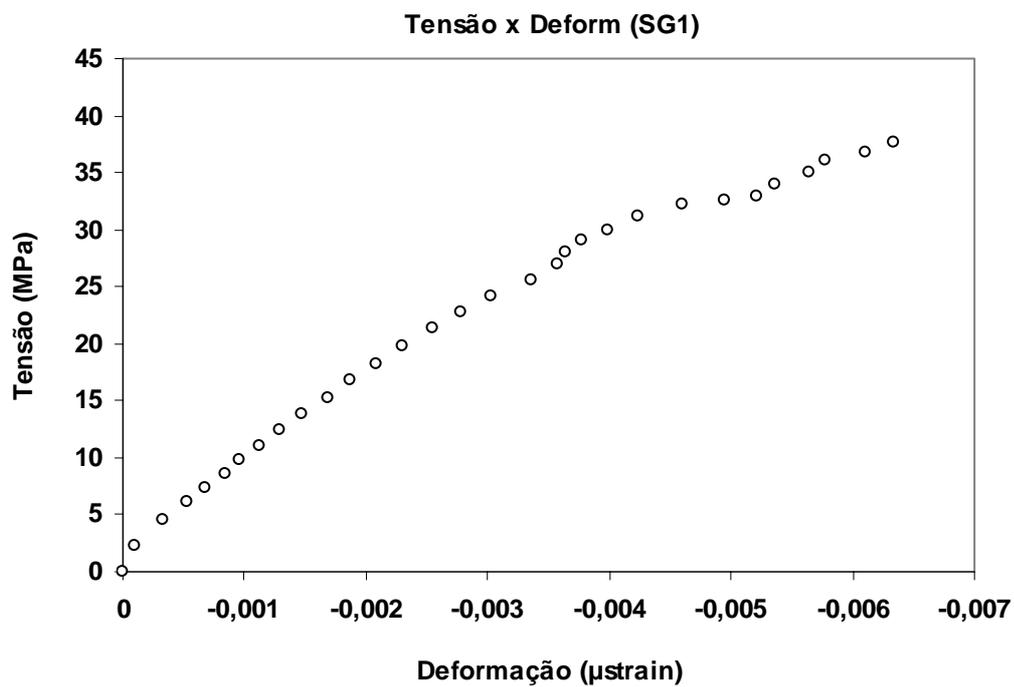


Figura 5.21 – Gráfico resultante do ensaio do corpo de prova 2T (SG1)

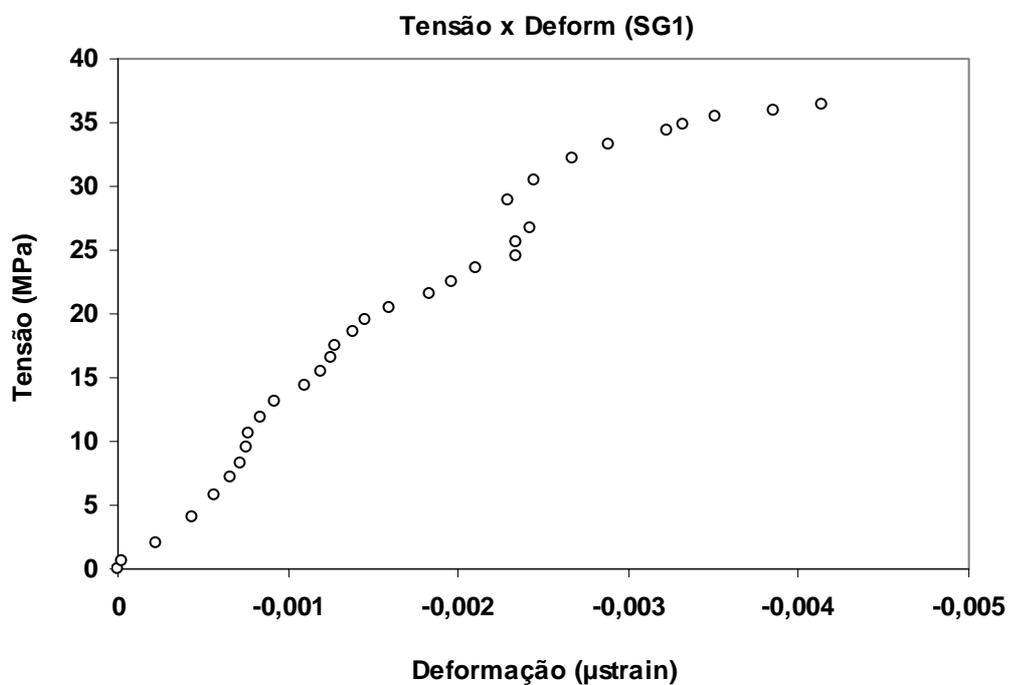


Figura 5.22 – Gráfico resultante do ensaio do corpo de prova 3T (SG1)

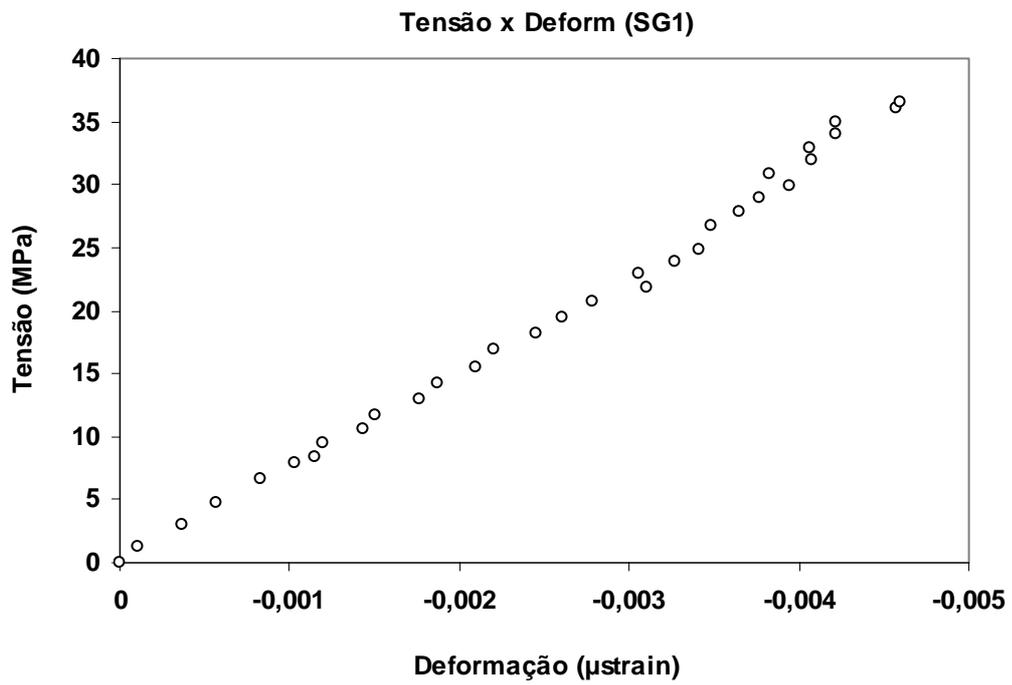


Figura 5.23 – Gráfico resultante do ensaio do corpo de prova 4T (SG1)

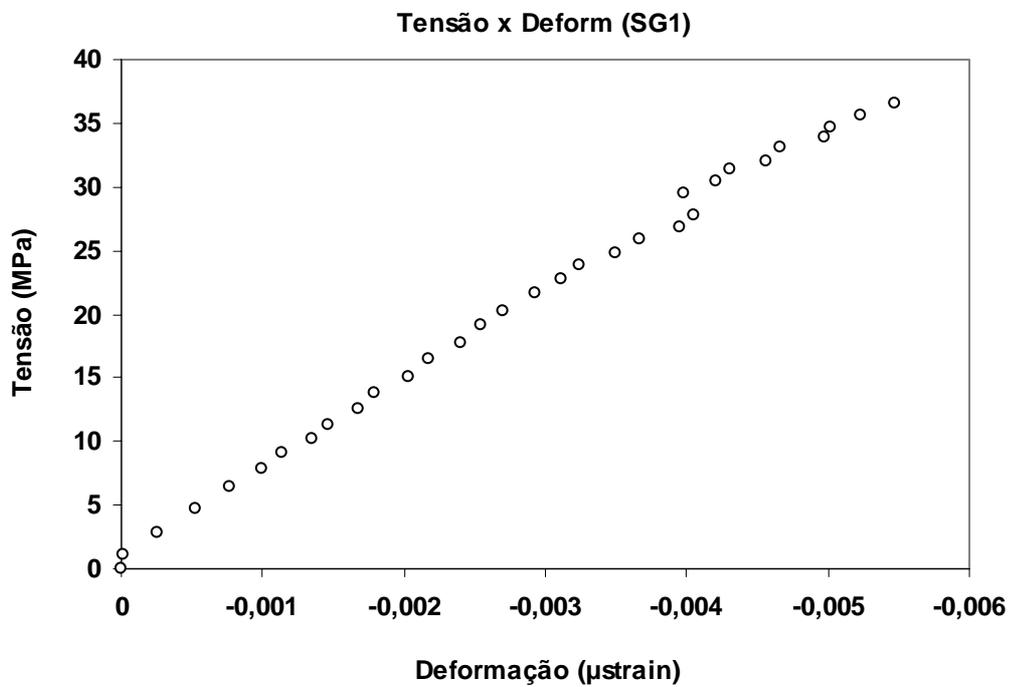


Figura 5.24 – Gráfico resultante do ensaio do corpo de prova 5T (SG1)

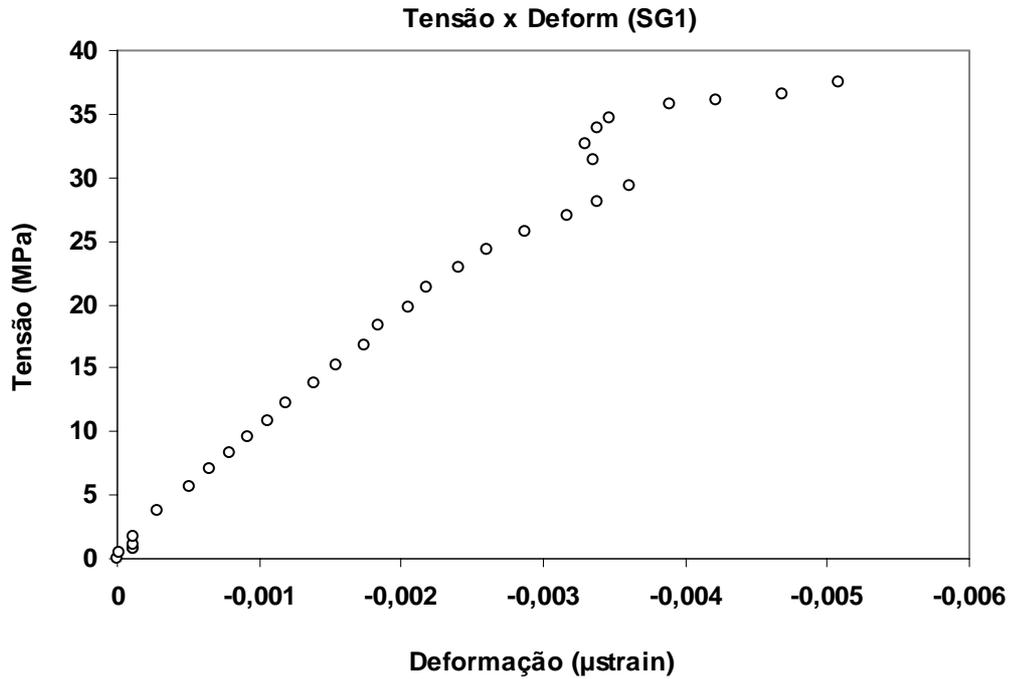


Figura 5.25 – Gráfico resultante do ensaio do corpo de prova 6T (SG1)

De posse das curvas do ensaio de caracterização do material pultrudado para as amostras longitudinais, onde se obteve as deformações através dos *Strain Gauges* nas direções longitudinal (SG2) e transversal (SG1), arbitrou-se, então, 2 (dois) pontos da porção linear das respectivas curvas tornando-se possível determinar o valor do Coeficiente de Poisson na direção longitudinal (ν_{12}) do material citado.

O coeficiente de Poisson foi calculado pela (Eq. 5.3):

$$\nu_{12} = -\frac{\Delta \varepsilon_2}{\Delta \varepsilon_1} \quad (5.3)$$

onde:

ε_2 : denota a deformação obtida pelo *Strain Gauge* transversal na porção da curva considerada para o cálculo de E_1 ;

ε_1 : denota a deformação obtida pelo *Strain Gauge* longitudinal na porção da curva considerada para o cálculo de E_1 .

Tabela 5.5 – Resultados do cálculo do Coeficiente de Poisson Longitudinal

CDPs	CDP Longitudinal (ν_{12})				ν_{12}
	Strain Gauge Transv. (SG1)		Strain Gauge Longit. (SG2)		
	Deform_pto 1 (*1e-7)	Deform_pto2 (*1e-7)	Deform_pto 1 (*1e-7)	Deform_pto2 (*1e-7)	
1L	-7.886,09	-16.356,62	26.413,20	56.040,96	0,29
2L	-5.840,13	-19.406,48	16.254,05	53.602,44	0,36
3L	-10.107,56	-22.445,42	29.726,41	66.799,54	0,34
4L	-8.121,91	-16.824,80	26.158,48	55.437,94	0,31
5L	-3.905,06	-14.917,42	11.433,99	43.374,93	0,34
6L	-	-	22.393,63	40.211,50	-
ν_{12} médio					0,33
Desvio Padrão					0,03
%					8,46

De posse das curvas do ensaio de caracterização do material pultrudado para as amostras transversais, onde se obteve as deformações através dos *Strain Gauges* nas direções longitudinal (SG2) e transversal (SG1), arbitrou-se, então, 2 (dois) pontos da porção linear das respectivas curvas tornando-se possível determinar o valor do Coeficiente de Poisson na direção transversal (ν_{21}) do material citado.

O coeficiente de Poisson foi calculado pela (Eq. 5.4):

$$\nu_{21} = -\frac{\Delta \varepsilon_2}{\Delta \varepsilon_1} \quad (5.4)$$

onde:

ε_2 : denota a deformação obtida pelo *Strain Gauge* transversal na porção da curva considerada para o cálculo de E_2 ;

ε_1 : denota a deformação obtida pelo *Strain Gauge* longitudinal na porção da curva considerada para o cálculo de E_2 .

Tabela 5.6 – Resultados do cálculo do Coeficiente de Poisson Transversal

CDPs	<i>CDP Transversal (v_{21})</i>				v_{21}
	<i>Strain Gauge Transv. (SG1)</i>		<i>Strain Gauge Longit. (SG2)</i>		
	<i>Deform_pto 1 (*1e-7)</i>	<i>Deform_pto2 (*1e-7)</i>	<i>Deform_pto 1 (*1e-7)</i>	<i>Deform_pto2 (*1e-7)</i>	
<i>1T</i>	-2.150,24	-3.466,48	27.276,53	43.858,33	0,08
<i>2T</i>	-612,58	-1.470,18	11.537,04	30.452,13	0,05
<i>3T</i>	-2.119,49	-2.344,88	41.997,58	55.611,27	0,05
<i>4T</i>	-1.146,11	-2.454,26	16.199,37	39.644,59	0,06
<i>5T</i>	-659,76	-2.078,05	9.471,74	30.035,34	0,07
<i>6T</i>	-920,09	-1.547,97	15.849,65	26.729,56	0,06
<i>v_{21} médio</i>					<i>0,06</i>
<i>Desvio Padrão</i>					<i>0,01</i>
<i>%</i>					<i>18,96</i>

Nos ensaios para caracterização do material, foram registrados também os valores referentes às máximas tensões de ruptura para cada corpo de prova.

Tabela 5.7 – Tensão máxima de ruptura dos CDPs

<i>Resistência (MPa)</i>			
<i>CDP Longitudinal</i>		<i>CDP Transversal</i>	
<i>1L</i>	313,88	<i>1T</i>	41,50
<i>2L</i>	323,57	<i>2T</i>	37,68
<i>3L</i>	299,41	<i>3T</i>	36,39
<i>4L</i>	321,14	<i>4T</i>	36,53
<i>5L</i>	327,97	<i>5T</i>	36,58
<i>6L</i>	340,90	<i>6T</i>	37,42
<i>Resistência média (MPa)</i>	<i>321,15</i>	<i>Resistência média (MPa)</i>	<i>37,68</i>
<i>Desvio Padrão (MPa)</i>	<i>13,91</i>	<i>Desvio Padrão (MPa)</i>	<i>1,94</i>
<i>%</i>	<i>4,33</i>	<i>%</i>	<i>5,15</i>

Assim, as propriedades descritas na Tabela 5.8 foram adotadas para os MEF do Banco de Capacitores.

Tabela 5.8 – Propriedades Mecânicas do PRFV utilizado

<i>Propriedades</i>	<i>Unidade</i>	<i>Média ± Desvio Padrão</i>
Módulo de Elasticidade Longitudinal	GPa	29,53 ± 1,47
Módulo de Elasticidade Transversal	GPa	4,49 ± 0,61
Resistência a Tração Longitudinal	MPa	321,15 ± 13,91
Resistência a Tração Transversal	MPa	37,68 ± 1,94
Coefficiente de Poisson Longitudinal	-	0,33 ± 0,03
Coefficiente de Poisson Transversal	-	0,06 ± 0,01

5.2) Análises Estática e Dinâmica para os MEF

5.2.1) Modelo de Validação do Ensaio

A análise estática para o modelo de validação do ensaio foi realizada a fim de obter a simulação do campo de tensões/deformações, para comparar com as deformações registradas pelos *Strain Gauges* instalados em 8 (oito) pontos diferentes da estrutura ensaiada.

Os oito pontos (Fig. 4.14) mencionados acima são pontos críticos definidos através de simulações de MEF realizadas preliminarmente, observando-se aspectos de deformações e tensões quando aplicadas as cargas de vento calculadas (Apêndice B).

Na realização do ensaio real para validação do modelo, os resultados se limitaram ao valor da carga de 153,85 kgf (1509,27 N), que foi a carga obtida durante a realização do mesmo. A carga se limitou a esse valor por questões de segurança, pois, como o poste de madeira não ficou totalmente rígido como necessário, ele começou a fletir e o ensaio foi interrompido, não atingindo a carga de ruptura da Estrutura de Validação.

A Figura 5.26 destaca o deslocamento da estrutura provocado pela deformação da mesma durante a realização do ensaio.



Figura 5.26 – Ensaio da Estrutura de Validação

5.2.2) Análise do Ensaio Real x MEF

Com o resultado obtido no ensaio real, várias análises foram realizadas. Considerando esse resultado, uma nova simulação para o modelo de validação foi realizada utilizando o ANSYS 5.7. Aplicou-se ao modelo a máxima carga de vento alcançada durante o ensaio, equivalente a 153,85 kgf (1509,27 N). Dessa forma foi possível uma análise mais detalhada MEF para comparação com os dados obtidos no ensaio real.

A Figura 5.27 mostra o resultado da análise estática realizada para o MEF de Validação, onde apresentam as tensões na direção do eixo-x do sistema de coordenadas local do elemento, chamadas tensões longitudinais. Pode ser observado também (Fig. 5.27) a coerência do MEF. As máximas tensões, como se previa, são observadas em regiões distantes do ponto da aplicação de carga de vento (horizontal).

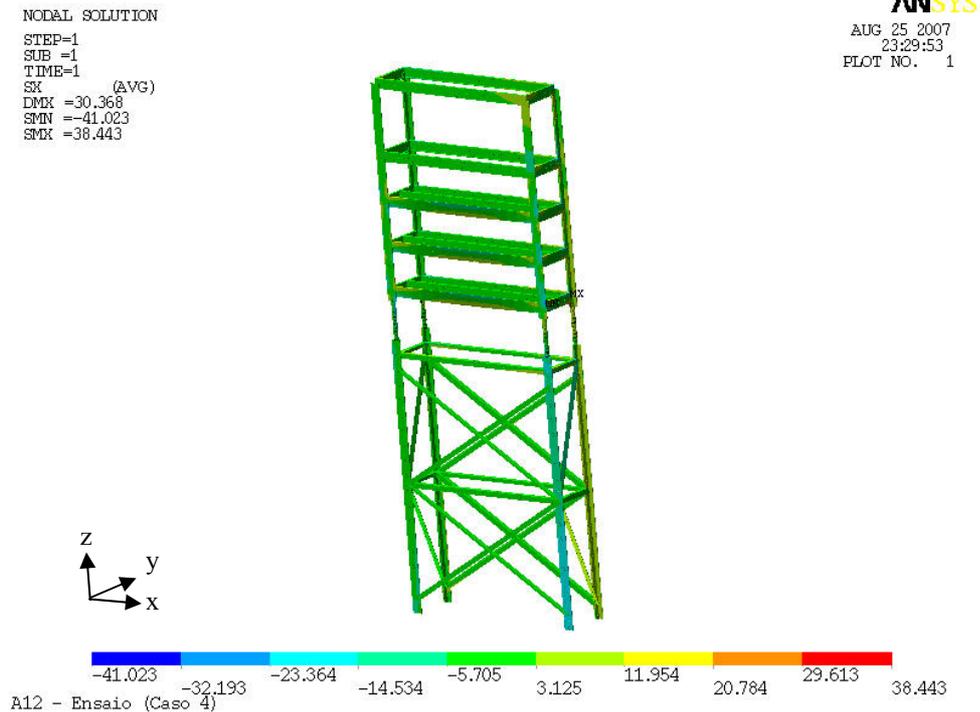


Figura 5.27 – Campos de tensões longitudinais (x-local) (MPa) para carga obtida no ensaio (1509,27 N)

As regiões de posicionamento dos Strain Gauges associadas a um número de elemento do modelo já definidos preliminarmente, é apresentado na Tabela 5.9. As deformações reais calculadas pela Equação 5.6, com fator de sensibilidade do *Strain Gauge* de 2,1 (S_g), e também as deformações em cada elemento listadas pela plataforma computacional ANSYS 5.7, juntamente com os valores de cargas foram plotadas (Figs. 5.28 a 5.35).

$$\frac{\Delta R}{R} = S_g \varepsilon_a \quad (5.6)$$

No ensaio da estrutura real ocorreram deformações iniciais que são atribuídas às massas dos capacitores, pois, o funcionamento do Sistema de Aquisição de Dados (SAD) se deu ao fim do posicionamento dos mesmos, e conseqüente início da aplicação da carga de vento na estrutura. Uma carga residual de 24,24 kgf (237,83 N), ocasionada por uma

pré-tensão do conjunto célula de carga e cabo de aço, foi constatada ao início do ensaio. Devido a essas deformações iniciais ocorridas, foi adotado um off-set nos resultados para plotagem dos gráficos comparativos entre as deformações do ensaio real e do MEF de validação (Figs. 5.28 a 5.35), para melhor apresentação e entendimento dos mesmos. As cargas de ensaio foram plotadas nos eixos das ordenadas e as deformações medidas nos eixos das abscissas.

Buscando contrapor a reta da modelagem de simulação e os pontos obtidos pelo ensaio, foi proposta uma aproximação entre ambos. Para tal, realizou-se o processo de ajuste das curvas adotando o princípio de regressão linear dos pontos do ensaio através do MSExcel 2003, ajuste este representado nos gráficos pela linha em vermelho. Tal procedimento possibilitou então confrontar visualmente os resultados obtidos para cada caso.

A Tabela 5.9 sumariza os valores de deformações obtidos nos 8 (oito) pontos críticos da estrutura durante a realização do ensaio e MEF no Ansys 5.7.

Tabela 5.9 – Deformações obtidas nos pontos críticos

<i>SG</i>	<i>Elemento</i>	$\epsilon_{\text{ENSAIO}} \text{ (strain)}$	$\epsilon_{\text{MODELO}} \text{ (strain)}$	<i>Erro (%)</i>
1	1043	$-1,82 \times 10^{-4}$	$-1,73 \times 10^{-4}$	5,20
2	1118	$1,96 \times 10^{-4}$	$1,61 \times 10^{-4}$	21,74
3	1105	$1,16 \times 10^{-4}$	$1,24 \times 10^{-4}$	-6,45
4	1071	$-1,96 \times 10^{-4}$	$-1,56 \times 10^{-4}$	25,64
5	1130	$2,48 \times 10^{-4}$	$2,96 \times 10^{-4}$	-16,22
6	1058	$-3,14 \times 10^{-4}$	$-4,10 \times 10^{-4}$	-23,41
7	1234	$-7,81 \times 10^{-5}$	$-8,20 \times 10^{-5}$	-4,76
8	971	$9,01 \times 10^{-5}$	$1,21 \times 10^{-4}$	-25,54

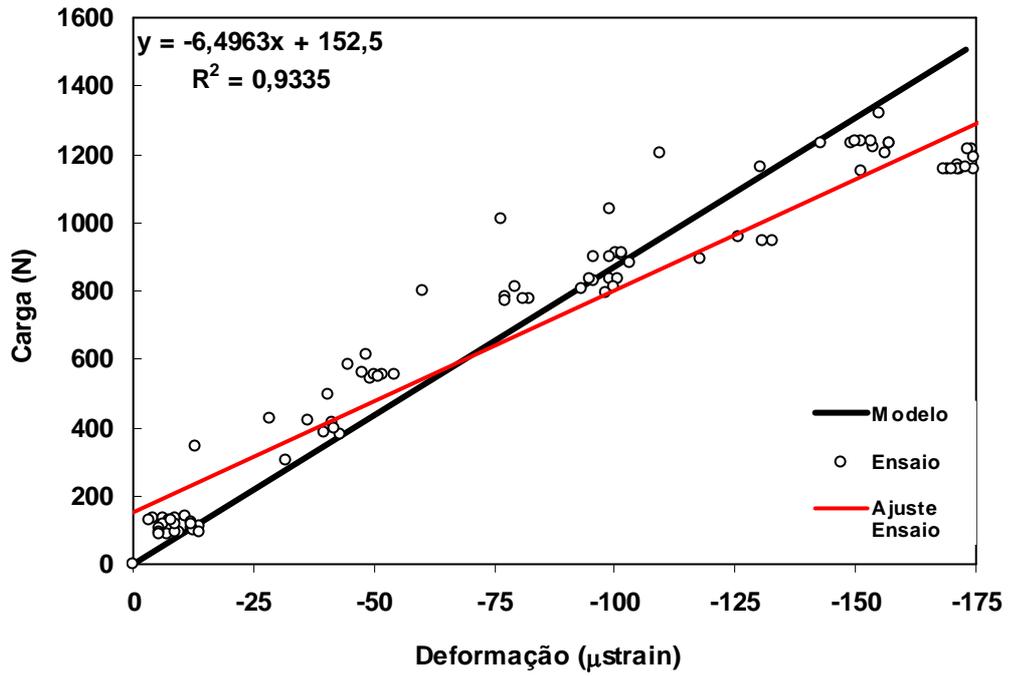


Figura 5.28 – Resultados para *Strain Gauge* 01

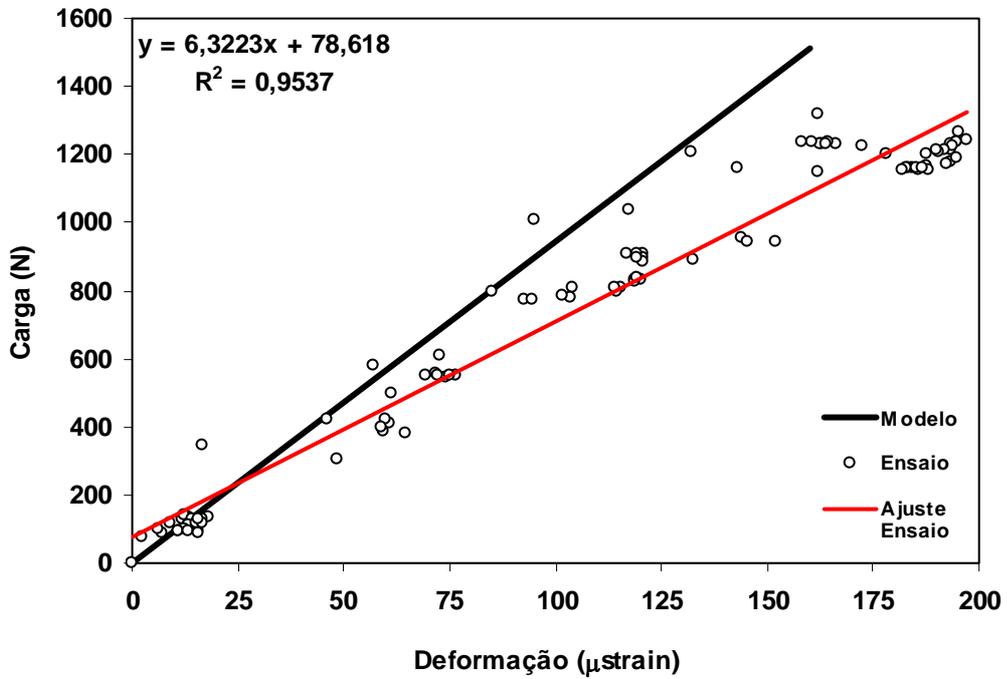


Figura 5.29 – Resultados para *Strain Gauge* 02

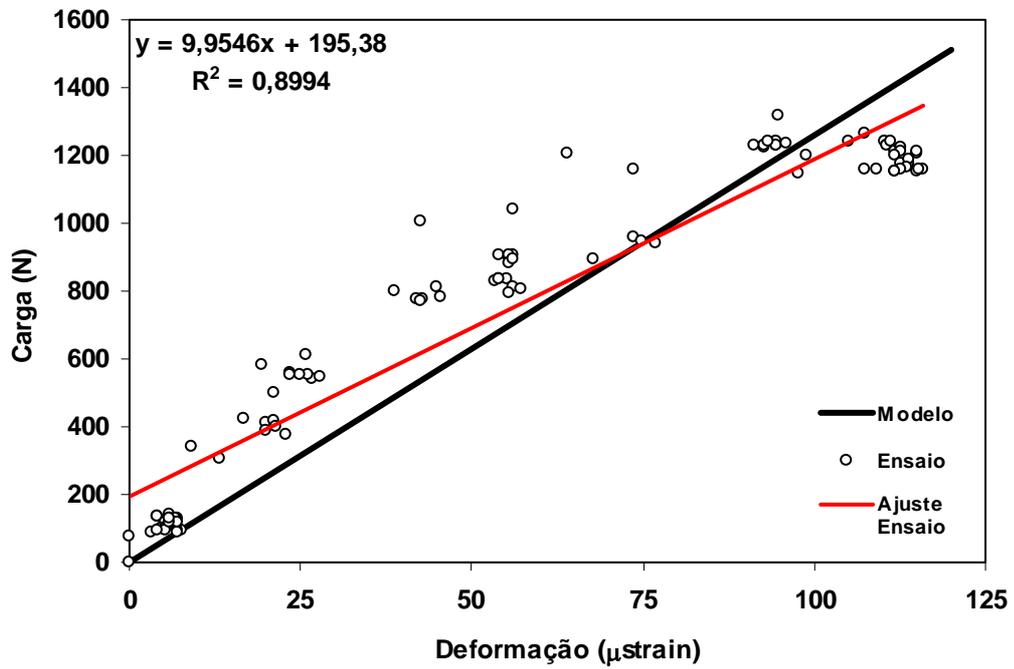


Figura 5.30 - Resultados para *Strain Gauge* 03

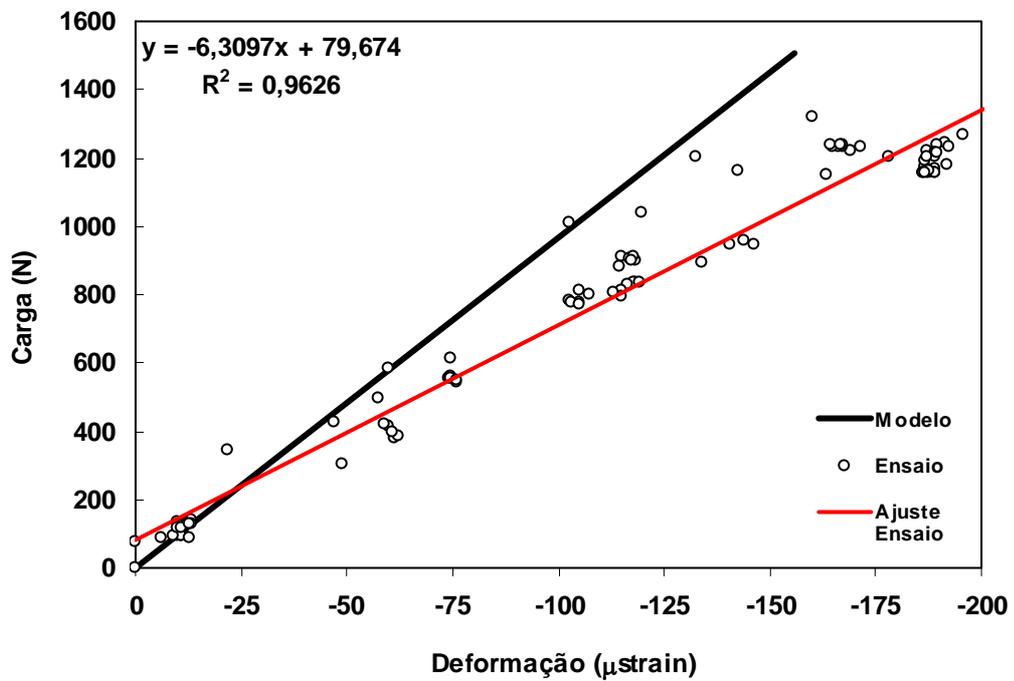


Figura 5.31 – Resultados para *Strain Gauge* 04

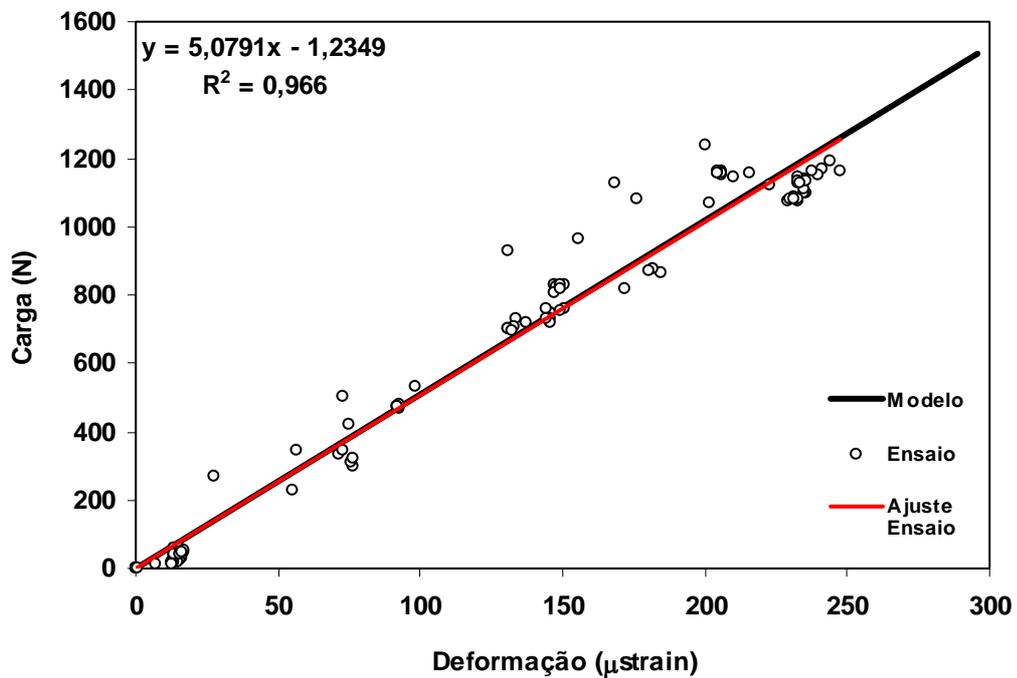


Figura 5.32 – Resultados para *Strain Gauge* 05

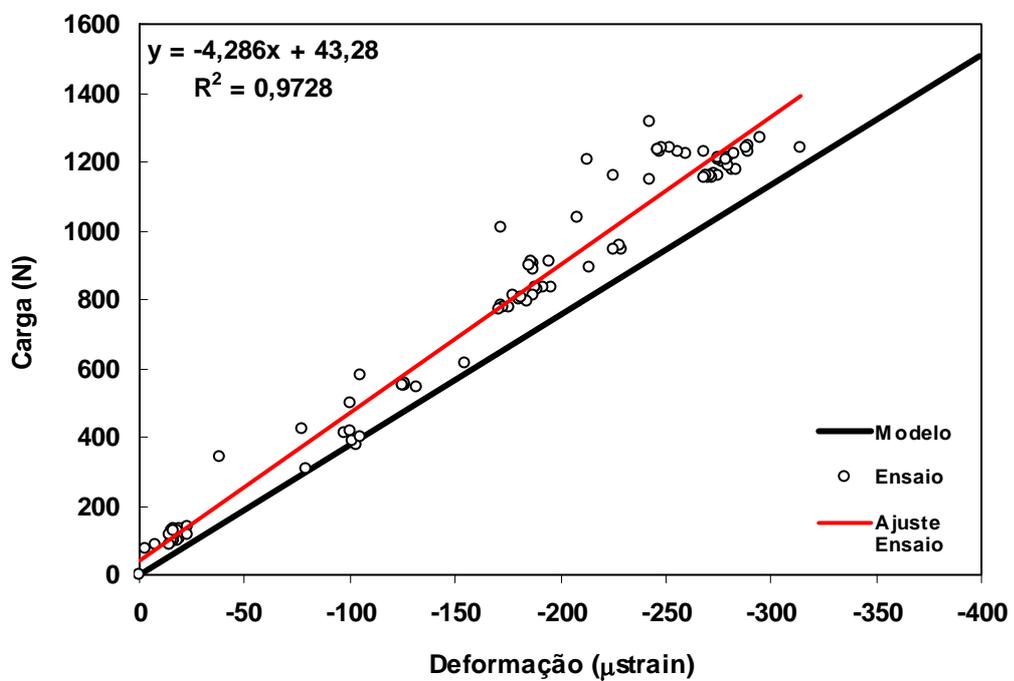


Figura 5.33 – Resultados para *Strain Gauge* 06

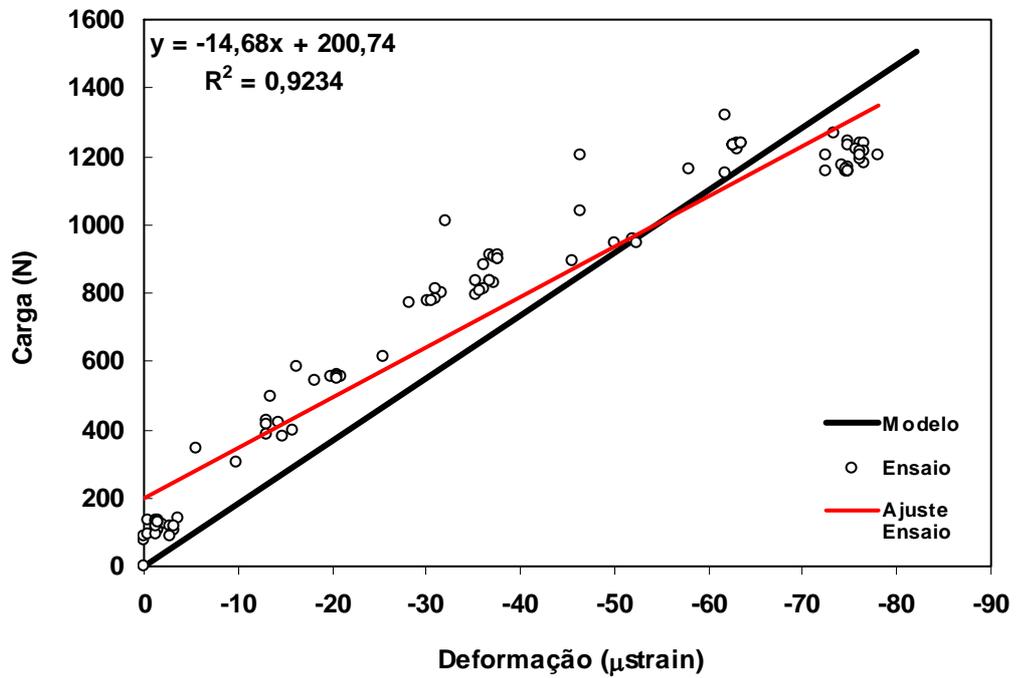


Figura 5.34 – Resultados para *Strain Gauge* 07

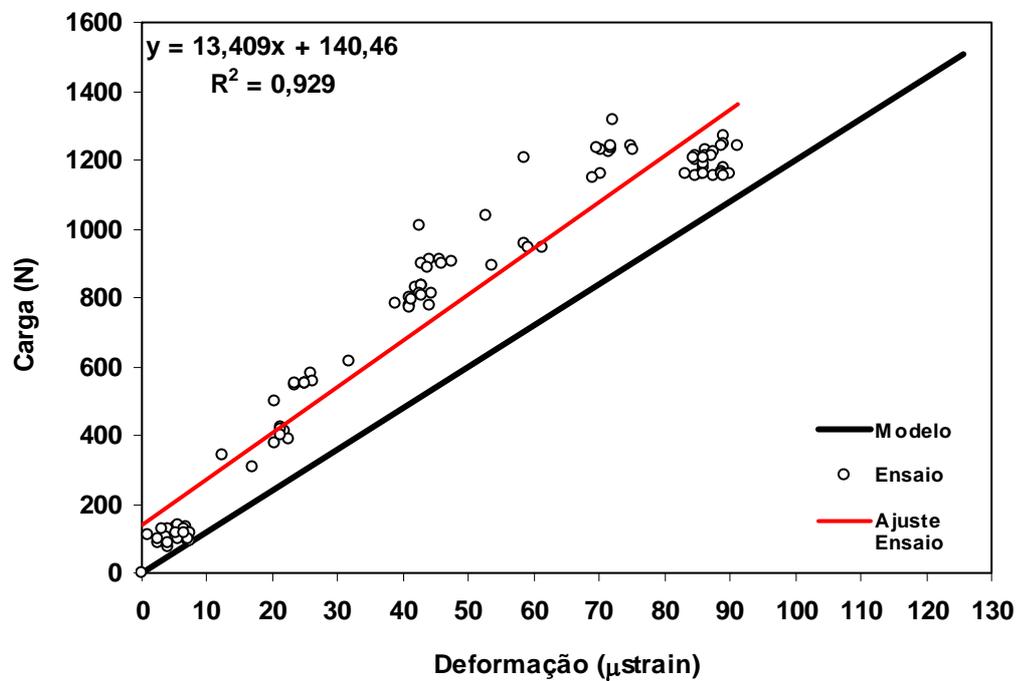


Figura 5.35 – Resultados para *Strain Gauge* 08

Verificando-se os gráficos, nota-se que, como as deformações medidas foram muito pequenas em função da baixa carga aplicada durante a realização do ensaio, os mesmos apresentam dispersão elevada e isso explica as não-linearidades, ou seja, não apresentaram a linearidade esperada.

Observando os valores máximos de deformação e suas respectivas cargas de ruptura obtidas para os CDP's durante os ensaios de caracterização do material, esperava-se a falha do material com deformações em torno de 12% (120.000 μ strain) e os gráficos mostram tensões máximas por volta de 0,03% (300 μ strain). Entretanto, pode-se notar que os prognósticos do modelo podiam corroborar a tendência do comportamento da estrutura, principalmente para os pontos com níveis mais altos de deformação.

5.2.3) Análise estática dos modelos de curto-circuito

As Figuras 5.36 a 5.38 mostram os resultados da análise estática realizada para os MEF dos casos 01, 02 e 03 de curto-circuito, onde apresentam as tensões na direção do eixo-x do sistema de coordenadas local do elemento, chamadas tensões longitudinais.

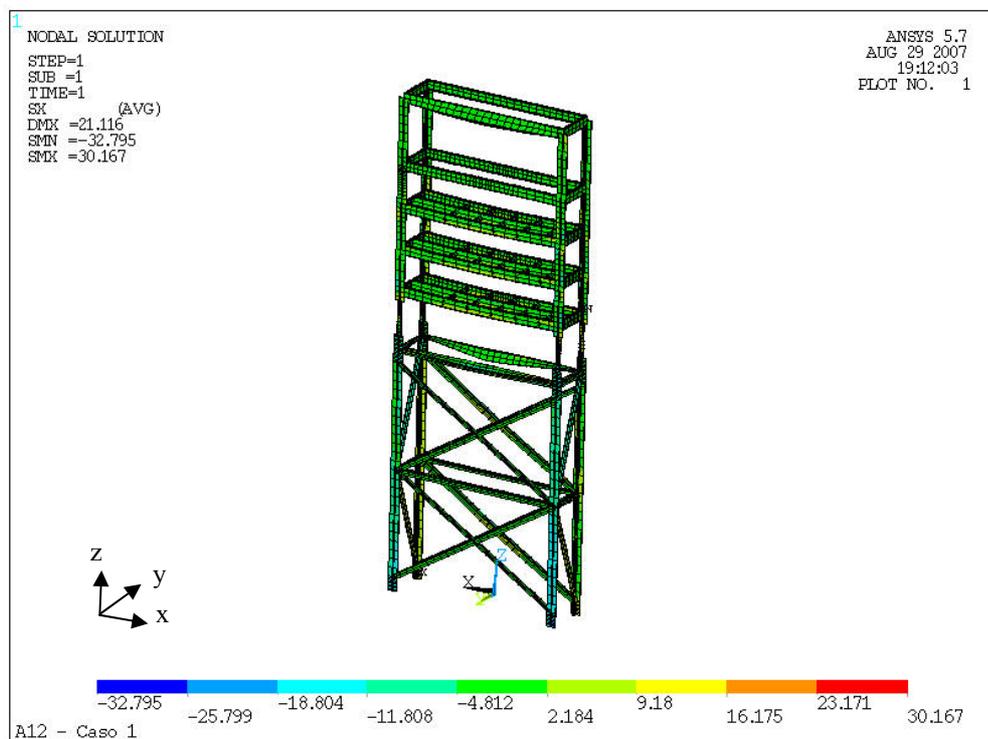


Figura 5.36 – Campos de tensões longitudinais (x-local) (MPa) para o caso 01

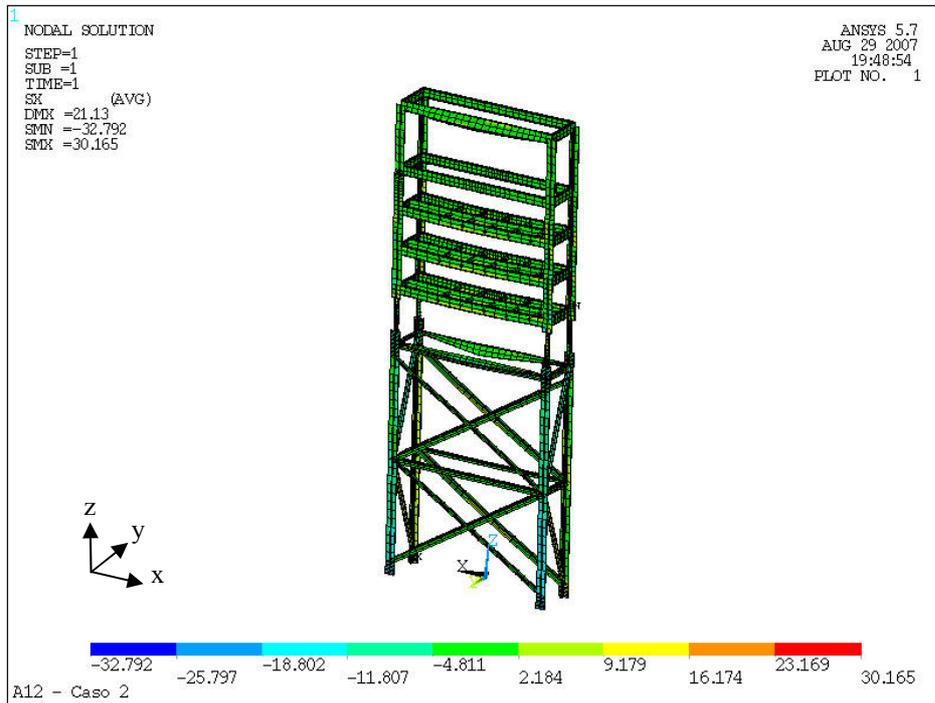


Figura 5.37 – Campos de tensões longitudinais (x-local) (MPa) para o caso 02

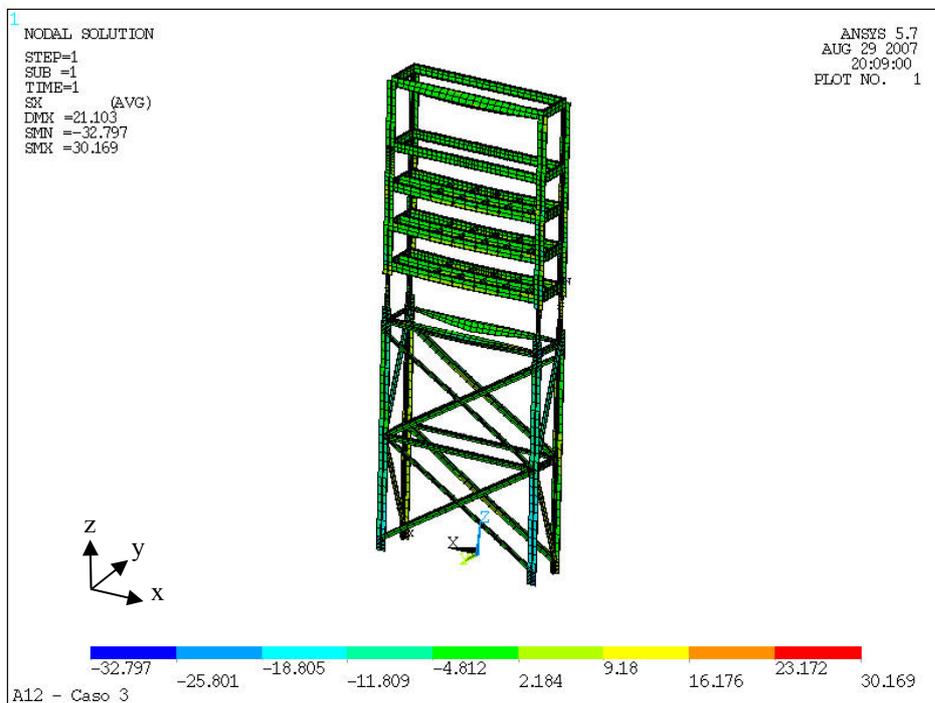


Figura 5.38 – Campos de tensões longitudinais (x-local) (MPa) para o caso 03

A análise estática para os casos 1, 2 e 3 resultou nos campos de tensões longitudinais com tensões máximas de 30,167 MPa, 30,165 MPa e 30,169 MPa respectivamente.

As Equações 3.21, apresentada no Capítulo 3, foi utilizada para a análise do critério de resistência mecânica. As margens de segurança (MS) para as tensões longitudinais (x-local) foram calculadas e apresentadas na Tabela 5.10.

$$MS = CS - 1 \quad (3.20)$$

$$MS = \frac{\sigma_{ult}}{\sigma_{adm}} - 1 \quad (3.21)$$

Considerou-se σ_{ult} como a tensão limite à tração obtida pelo programa de ensaios de caracterização do material e σ_{adm} o maior valor obtido na análise de tensões. O σ_{adm} pode ser também tratado como σ_{max} , ou seja, $\sigma_{adm} = \sigma_{max}$.

Tabela 5.10 – Margens de segurança para a tensão máxima longitudinal (x-local)

<i>Caso</i>	σ_{ult} (MPa)	σ_{max} (MPa)	<i>MS</i>
Caso 01	321,150	30,167	9,646
Caso 02	321,150	30,165	9,646
Caso 03	321,150	30,169	9,645

Pode ser observado que as margens de segurança são todas positivas e altas, indicando que a estrutura atende bem as solicitações estáticas.

5.2.4) Análise de estabilidade para os modelos de curto-circuito

A resposta estrutural de flambagem para as estruturas treliçadas é muito sensível às condições de contorno impostas às suas barras estruturais (suportes). Ainda, em relação ao critério de estabilidade da estrutura ressalta-se que, sendo o tipo de elemento utilizado (elemento de viga) capaz de transferir momentos para os nós, o auto-valor (λ) calculado pela PC ANSYS é pra barras bi-engastadas. Porém, pela condição de união

entre das barras do Banco de Capacitores (utilização de parafusos), a flambagem ocorre numa tensão intermediária entre os casos perfeitamente engastado (restrição dos seis graus de liberdade) e perfeitamente articulada (apenas os três graus de liberdade de translação restringidos, com três graus de liberdade angulares livres). É muito difícil obter a real condição de contorno das barras de uma estrutura treliçada, pois esta tarefa depende muito da rigidez de fixação dos membros ou perfis.

Somente análise global de falha de flambagem foi realizada. Os perfis L e U usualmente sofrem flambagem elástica local nas extremidades antes da falha global da coluna. Este efeito não foi avaliado neste trabalho.

A análise de estabilidade foi realizada para os três casos críticos de carregamento. Autovalores (λ) para as primeiras barras a flambar foram determinados para cada caso. Estes autovalores representam a média entre a carga crítica de flambagem (P_{cr}) dividido pela carga atuante em cada barra (P), como mostra a Equação 3.29.

Dessa forma, duas equações foram utilizadas para a análise de estabilidade do Banco de Capacitores. A primeira, para barra bi-engastada, com $L_e = 0,5L$ e a segunda, para barra bi-articulada, com $L_e = L$ que substituídos na Equação (3.26) obteve-se as Equações 5.3 e 5.4.

$$\sigma_{cr} = 4 \cdot \frac{\pi^2 \cdot E \cdot r^2}{L^2} \quad (5.3)$$

$$\sigma_{cr} = \frac{\pi^2 \cdot E \cdot r^2}{L^2} \quad (5.4)$$

Sendo tensão crítica à flambagem de barras bi-articuladas 4 (quatro) vezes menor que a tensão crítica à flambagem de barras bi-engastadas, tem-se a Equação 5.5 para o cálculo do auto-valor de barras bi-articuladas (λ_{ba}):

$$\lambda_{ba} = \frac{\lambda_{be}}{4} \quad (5.5)$$

De um modo geral da Equação 3.29, obtém-se a Margem de Segurança à flambagem (MS_f).

$$MS_f = \frac{P_{cr}}{P} - 1 = \lambda - 1 \quad (3.29)$$

As Figuras 5.39 a 5.47 mostram o primeiro, segundo e terceiro modos de flambagem apresentados pelos modelos dos casos 1, 2 e 3 de curto-circuito.

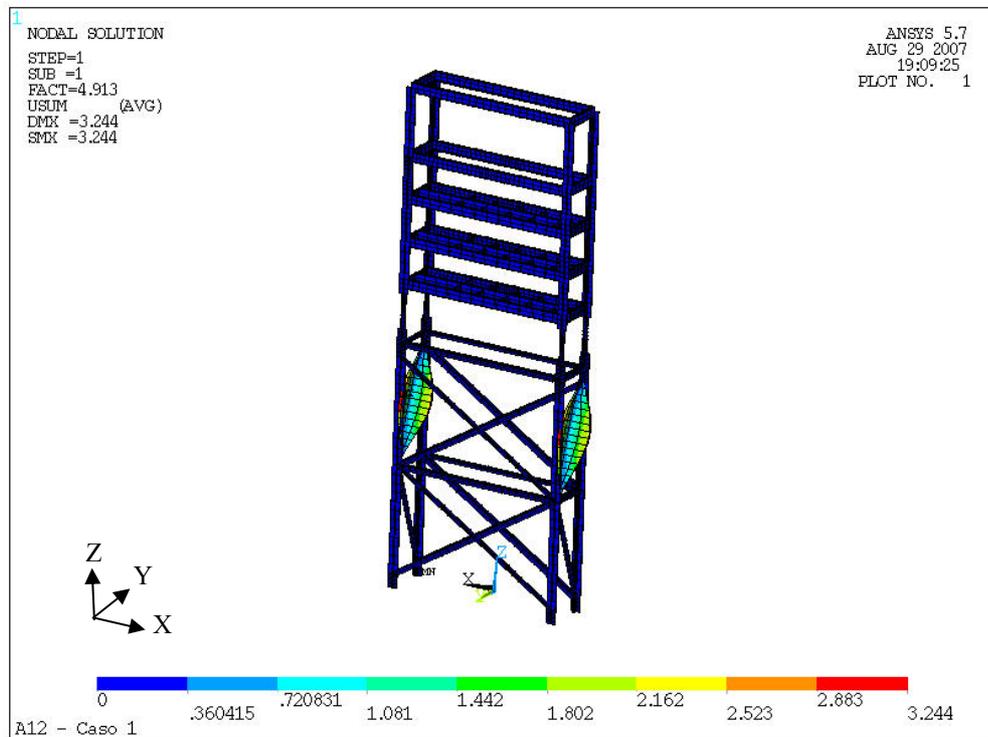


Figura 5.39 – Primeiro modo de flambagem para o caso 01

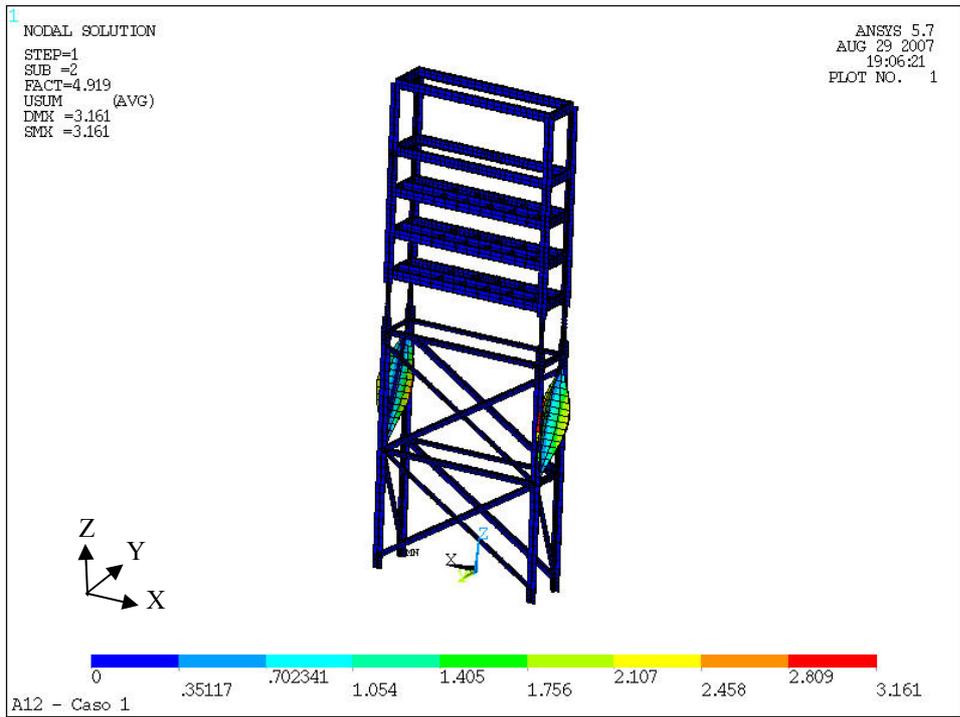


Figura 5.40 – Segundo modo de flambagem para o caso 01

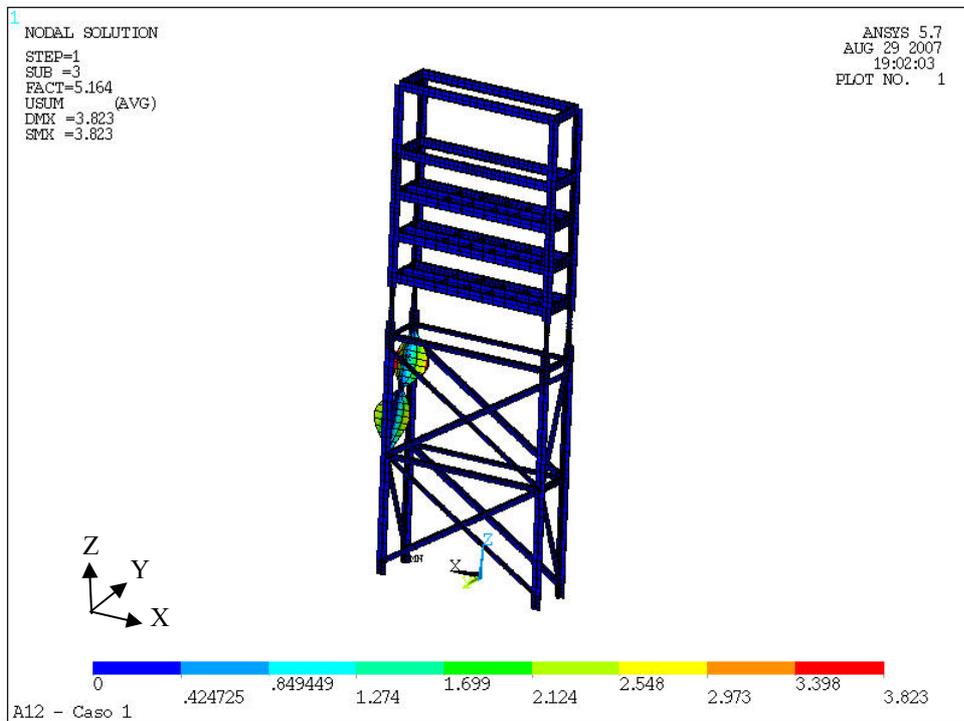


Figura 5.41 – Terceiro modo de flambagem para o caso 01

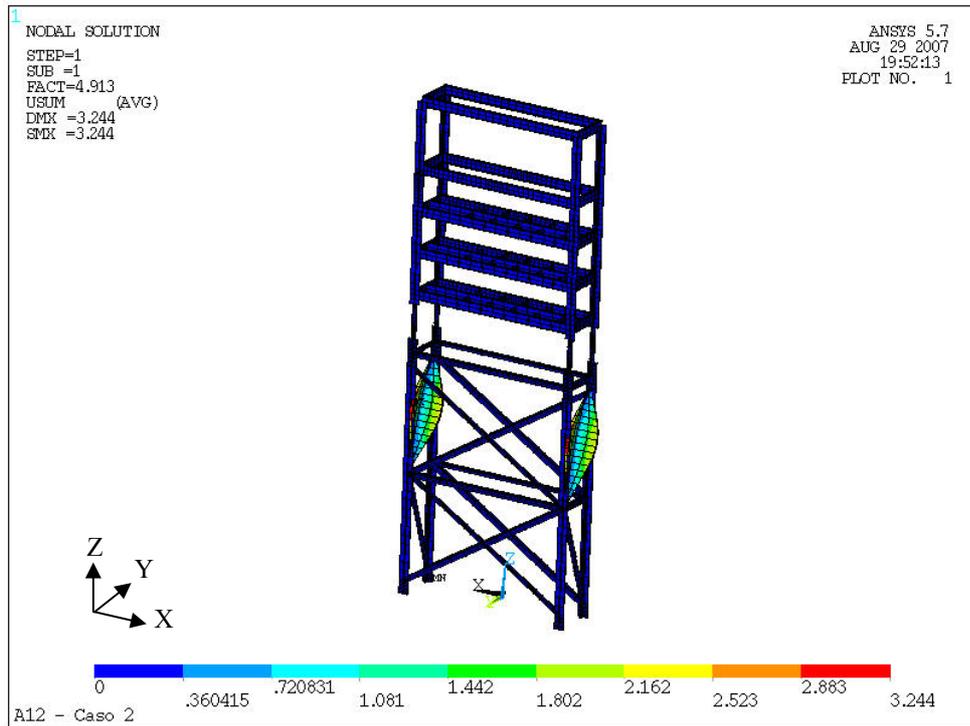


Figura 5.42 – Primeiro modo de flambagem para o caso 02

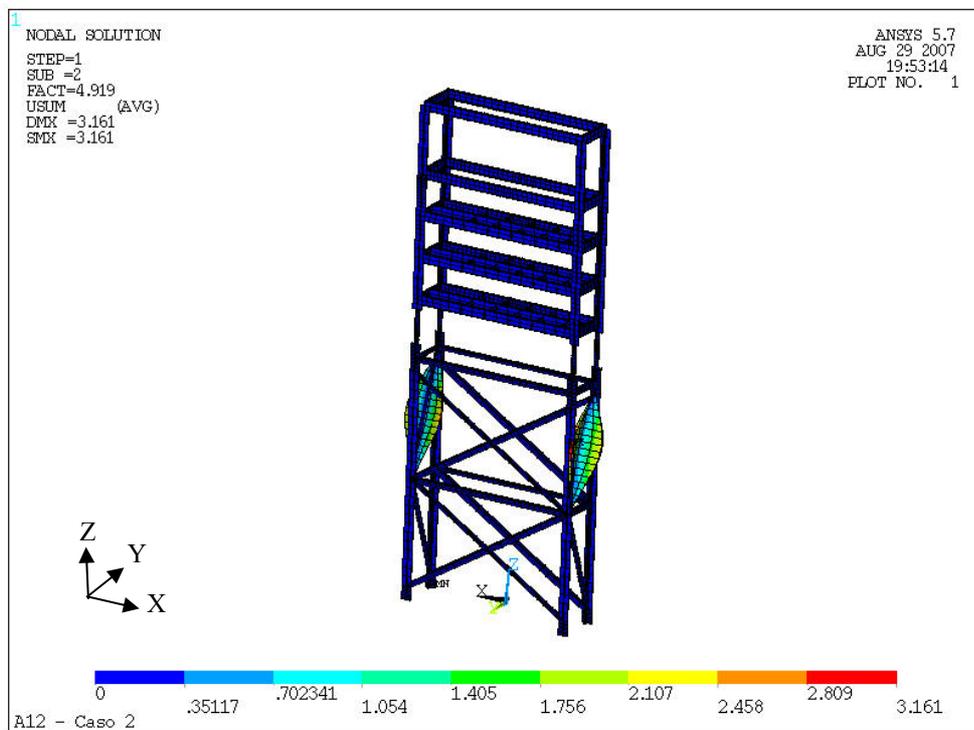


Figura 5.43 – Segundo modo de flambagem para o caso 02

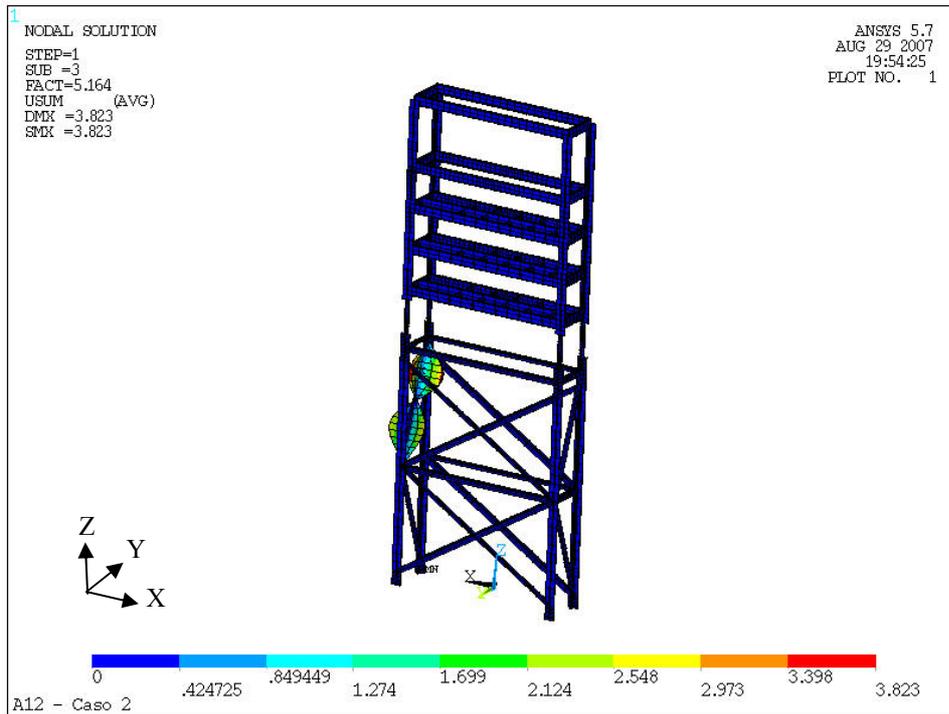


Figura 5.44 – Terceiro modo de flambagem para o caso 02

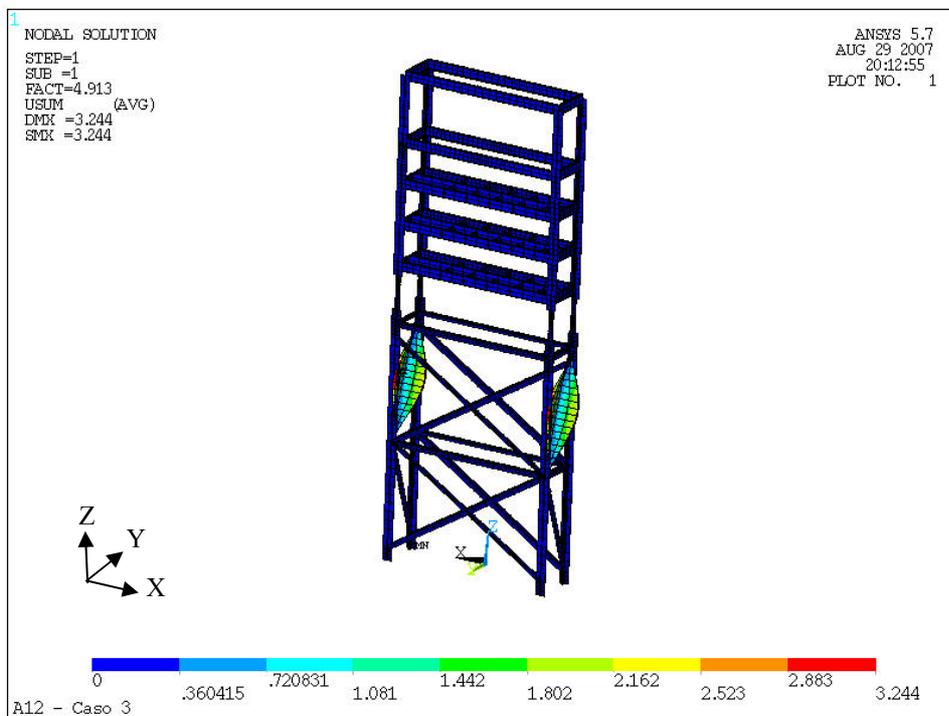


Figura 5.45 – Primeiro modo de flambagem para o caso 03

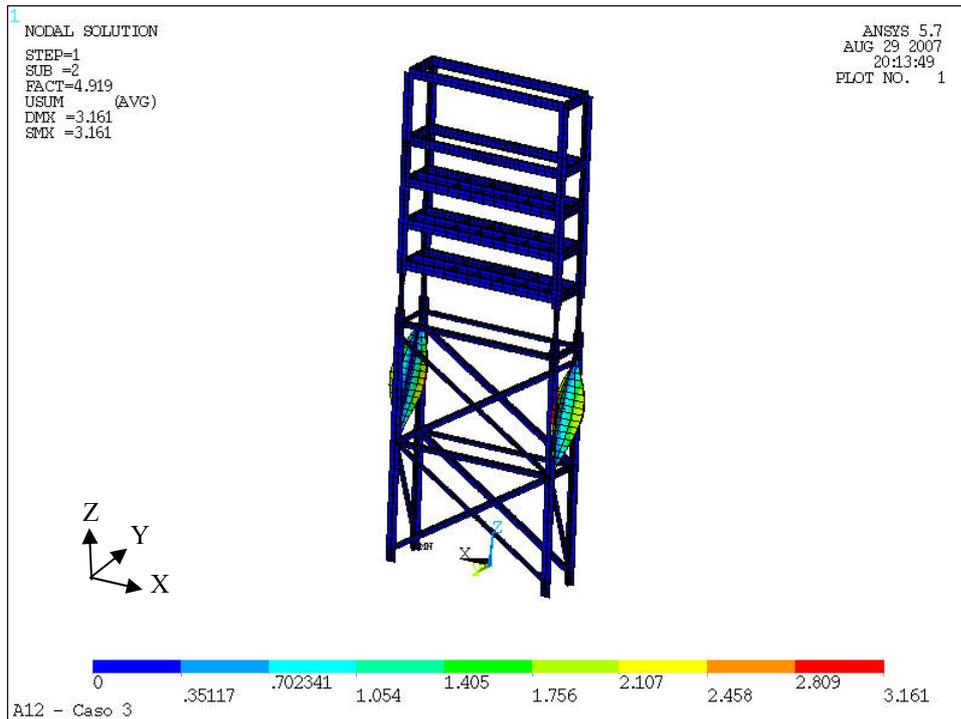


Figura 5.46 – Segundo modo de flambagem para o caso 03

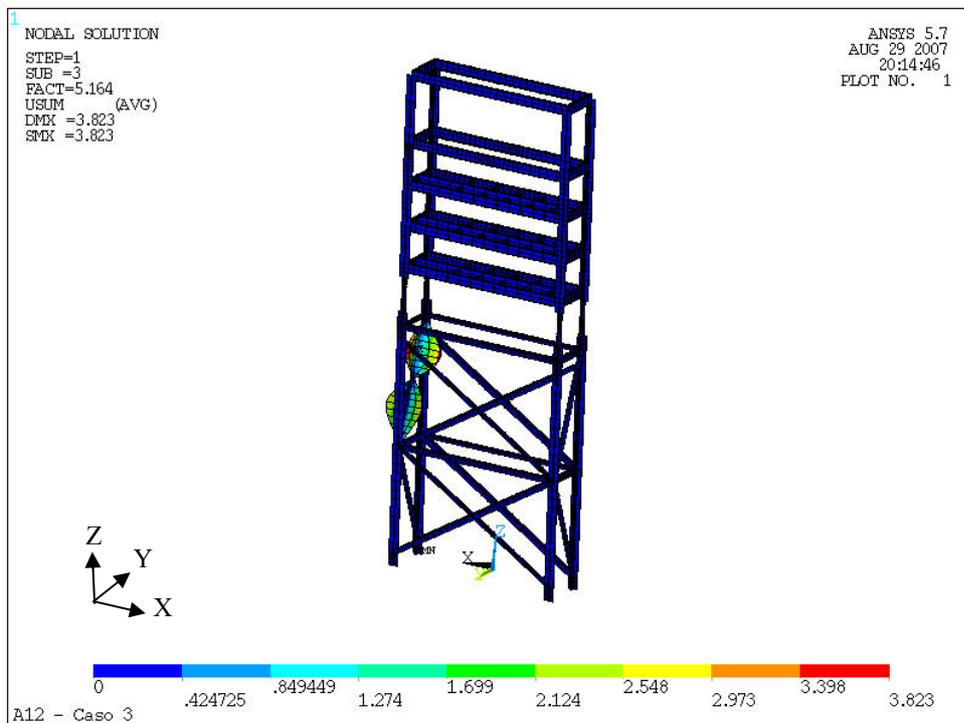


Figura 5.47 – Terceiro modo de flambagem para o caso 03

A seqüência de flambagem para o primeiro, segundo e terceiro modos foi exatamente a mesma com os mesmos auto-valores para todos os casos, ou seja, casos 1, 2 e 3, mostrada nas Figuras 5.39 a 5.41, 5.42 a 5.44, 5.44 a 5.47, respectivamente.

As Tabelas 5.11, 5.12 e 5.13 apresentam os resultados obtidos, para a primeira, segunda e terceira barra a flambar. As margens de segurança para as condições de contorno para barras bi-engastadas e bi-articuladas, respectivamente MS_{fbe} e MS_{fba} , foram avaliadas de acordo com a Equação 3.29 e apresentadas adjacentes às colunas de λ_{be} e λ_{ba} . Esses valores podem ser considerados os limites máximo e mínimo para margens de segurança à flambagem para a estrutura real.

Tabela 5.11 – Margens de segurança para o primeiro modo de flambagem

<i>Caso</i>	λ_{be}	MS_{fbe}	λ_{ba}	MS_{fba}
<i>Caso 01</i>	4,913	3,913	1,228	0,228
<i>Caso 02</i>	4,913	3,913	1,228	0,228
<i>Caso 03</i>	4,913	3,913	1,228	0,228

Tabela 5.12 – Margens de segurança para o segundo modo de flambagem

<i>Caso</i>	λ_{be}	MS_{fbe}	λ_{ba}	MS_{fba}
<i>Caso 01</i>	4,919	3,919	1,230	0,230
<i>Caso 02</i>	4,919	3,919	1,230	0,230
<i>Caso 03</i>	4,919	3,919	1,230	0,230

Tabela 5.13 – Margens de segurança para o terceiro modo de flambagem

<i>Caso</i>	λ_{be}	MS_{fbe}	λ_{ba}	MS_{fba}
<i>Caso 01</i>	5,164	4,164	1,291	0,291
<i>Caso 02</i>	5,164	4,164	1,291	0,291
<i>Caso 03</i>	5,164	4,164	1,291	0,291

Os valores apresentados nas Tabelas 5.11 a 5.13 mostram que, apesar da diferença de esforços entre os três casos de curto circuito, o grau de criticidade é o mesmo para ambos, entretanto, obviamente o primeiro modo de flambagem apresentou a menor margem de segurança.

A margem de segurança de flambagem da estrutura para o primeiro modo está próximo de 4 (391%) considerando condição de contorno bi-engastada para as barras (limite superior) e de 0,228 (22,8%) considerando condição de contorno bi-articulada (limite inferior). As margens de segurança são altas para a condição de contorno engastada, entretanto, as margens de segurança para a condição articulada são baixas.

Embora as barras da estrutura real tenham uma margem de segurança entre estes limites superior e inferior, é razoável assumir que a estrutura está de alguma maneira próximo da falha. Portanto, é recomendável o reforço das barras ou perfis críticos que apresentaram margens de segurança baixas.

CAPÍTULO 6

Conclusões

Este trabalho apresentou um estudo da viabilidade técnica da aplicação de compósitos pultrudados em estruturas treliçadas de bancos de capacitores de subestação de energia elétrica. Por razões previamente estabelecidas, a estrutura de um Banco de Capacitores (Pórtico A 12) foi o alvo de estudo.

Modelos de elementos finitos foram desenvolvidos para realizar análises estática e dinâmica da estrutura. As propriedades mecânicas utilizadas para os modelos foram obtidas através de um programa de ensaios para caracterização do material.

Um protótipo da estrutura foi construído em escala real, instrumentado e ensaiado para validação do modelo, no qual os resultados registrados foram coerentes com o previsto no modelo.

Adicionalmente, três modelos de casos críticos foram simulados, contemplando as cargas referentes aos pesos dos capacitores, máxima carga de vento calculada e cargas de curto circuito.

Resultados mostraram margens de segurança elevadas para a análise estática. Quanto às margens de segurança para estabilidade global da estrutura, foram boas para a condição de contorno bi-engastada ($MS \cong 3,9$) e baixas para condição bi-articulada ($MS \cong 0,23$). Conseqüentemente, é recomendável o reforço em perfis que tiveram margens de segurança baixas na análise de flambagem para a condição de contorno bi-articulada.

De uma forma geral, os resultados mostraram que a aplicação de material composto pultrudado atende de forma satisfatória aos esforços atuantes na estrutura do banco de capacitores, confirmando assim a viabilidade do uso alternativo do material nesse tipo de estrutura.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

ABNT, NBR 599, 1987, *Forças Devidas ao Vento em Edificações* – Associação Brasileira de Normas Técnicas, Rio de Janeiro.

ABNT, NBR 5422, 1985, *Projeto de Linhas Aéreas de Transmissão de Energia Elétrica* – Associação Brasileira de Normas Técnicas, Rio de Janeiro.

Ahmadian, R. & Mantena, P. R., 1995, Modal Characteristics of Structural Portal Frames Made of Mechanically Joined Pultruded Flat Hybrid Composites, *Journal of Composite Materials*, pág. 319-328.

Almeida, S. P. S., 2004, *Avaliação das Propriedades Mecânicas de Compósitos Pultrudados de Matriz Polimérica com Reforço de Fibras de Vidro*, Dissertação de Mestrado, Programa de Pós-Graduação de Engenharia, Universidade Federal do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, RJ, Brasil.

ASTM, D 3039/D 3039 M, 2002, *Standard Test Method for Tensile Properties of Polymer Matrix Composite Materials* – ASTM International, United States.

Beer, F. P. & Johnston, E. R., 1995, *Resistência dos Materiais*, 3 ed., São Paulo, Editora Makron Books.

Brown, R. T. & Zureick, A., 2001, Lightweight Composite Truss Section Decking, *Journal of Marine Structures*, pág. 115-132.

Budinich, M. D. & Trahan R. E., 1995, Dynamic Analysis of Substation Busbar Structures, *Journal of Electric Power Systems Research*, pág. 47-53.

Calama, J. M. R. & Gómez Terreros, 1996, “Los Materiales Compuestos y su Empleo en Estructuras de Edificación”, *Libro de Actas de la Iª Conferencia Internacional Sobre los Materiales Compuestos Aplicados en Arquitectura y Construcción*, pág. 297-305.

Callister, W. D., 2002, *Ciência e Engenharia de Materiais: Uma Introdução*, 5 ed., Rio de Janeiro, LTC - Livros Técnicos e Científicos Editora S.A.

CME, Pultrusion System, Disponível em www.cmeargentina.com, Acesso em 24/10/06.

Cogumelo, Pultrudados em Fibra de Vidro, Disponível em www.cogumelo.com.br, Acesso em 23-10-2006.

Comino, A. P. I., 1996, “La Fibra de Vidrio AR en la Construcción”, Libro de Actas de la Iª Conferencia Internacional Sobre los Materiales Compuestos Aplicados en Arquitectura y Construcción, pág. 427-437.

Costa, E. V., 1974, *Curso de Resistência dos Materiais com Elementos de Grafostática e de Energia de Deformação*, v. 2, São Paulo, Companhia Editora Nacional.

Crawford, J., 2006, “Understanding Beam Elements”, Ansys Solutions, v. 7, issue 2.

Daniel, I. M. & Ishai, O., 1994, *Engineering Mechanics of Composite Materials*, New York, Editora Oxford University Press.

Elgerd, O. I., 1976, *Introdução à Teoria de Sistemas de Energia Elétrica*, São Paulo, Editora McGraw-Hill do Brasil Ltda.

Filho, A. A., 2000, *A Base da Tecnologia CAE*, 1 ed., São Paulo, Editora Érica.

Furtado, D. A. T. & Cunha, J., 2005, *Simulação Numérica de Estruturas Reticuladas de Construção Civil Formadas por Materiais Compostos*, Dissertação de Mestrado, Faculdade de Engenharia Civil, Universidade Federal de Uberlândia, Uberlândia, MG, Brasil.

Gaylord, E. H. & Stallmeyer, J. E., 1992, *Design of Steel Structures*, 3 ed., USA, Editora McGraw-Hill.

Hashin, Z., 1983, *Analysis of Composites Materials*, Journal of Applied Mechanics, vol. 50, pág. 481-485.

Jones, Robert M., 1975, *Mechanics of Composite Materials*, USA, Scripta Book Company.

Juvandes, L. et al, 1996, *The Use of Composites Materials for Building Construction*, de Actas de la Iª Conferencia Internacional Sobre los Materiales Compuestos Aplicados en Arquitectura y Construcción, pág. 465-476.

Karbhari, V. M. & Zhao, L., 1999, *Use of Composites for 21st Century Civil Infrastructure*, *Journal of Computer Methods in Applied Mechanics and Engineering*, pág. 433-454.

Kaw, A. K., 1997, *Mechanics of Composite Materials*, New York, Editora CRC Press LLC.

Kindermann, G., 1997, *Curto-circuito*, 2 ed., Porto Alegre, Editora Sagra Luzzato.

Kraus, J. D. & Carver, K. R., 1973, *Electromagnetics*, 2 ed., Editora McGraw-Hill.

Labegalini, P.R. et al., 1992, *Projetos Mecânicos das Linhas Aéreas de Transmissão*, 2 ed., São Paulo, Editora Edgard Blücher Ltda.

Mangonon, P. L., 1999, *The Principles of Materials Selection for Engineering Design*, 10 ed., vol1, New Jersey, Editora Prentice Hall.

Mao, Y. et al., 2004, *Monitoring Failure Behavior of Pultruded CFRP Composites by Electrical Resistance Measurement*, College of Materials Science and Engineering, Beijing University of Chemical Technology.

Mendonça, P. T. R., 2005, *Materiais Compostos e Estruturas Sanduíche - Projeto e Análise*, 1 ed., Barueri-SP, Editora Manole Ltda.

Morais, W. A. et all., 2001, *Efeito de Impactos Repetidos de Baixa Energia em Compósitos Pultrudados*, *Revista de Polímeros: Ciência e Tecnologia*, pág. 27-34.

Mottram, J. T. & Zheng, Y., 1997, State-of-the-Art Review on the Design of Beam-to-Column Connections for Pultruded Frames, *Journal of Composite Structures*, pág. 387-401.

Nagahama, K. J., 2003, Análise de Estabilidade Local em Perfis de Seção Aberta em Aço e em Resina Reforçada com Fibra de Vidro, Tese de Doutorado, Programa de Pós-Graduação de Engenharia, Universidade Federal do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, RJ, Brasil.

NIST, Advanced, Technology Program, Disponível em www.nist.gov/public, Acesso em 24/10/06.

OWENS CORNING, Soluções para Compósitos, Disponível em www.owenscorning.com.br, Acesso em 24/10/06.

Paciornik, F. M. S. et al., 2002, “Analysis of the Mechanical Behavior and Characterization of Pultruded Glass Fiber-Resin Matrix Composites”, *Journal of Composites Science and Technology*, pág. 295-304.

Pansini, A. J., 1975, *Basic Electrical Power Transmission*, New Jersey, Editora Hayden Book Company, INC.

Pereira, J. C., *Curso de Projeto Estrutural com Materiais Compostos - Apostila*, GRANTE – Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis, SC, Brasil.

Pierin, I., 2005, Estudo de Estabilidade de Perfis Pultrudados de Materiais PRFV, Dissertação de Mestrado, Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil, Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis, SC, Brasil.

Popov, E. P., 1984, *Resistência dos Materiais*, 2 ed., Rio de Janeiro, Editora Prentice-Hall do Brasil Ltda.

Prabhakaran, R. et al., 1995, “Load and Resistance Factor Design (LRFD) Approach for Bolted Joints in Pultruded Composites”, *Journal of Composites Science and Technology*, pág. 351-360.

Roeper, R., 1975, *Correntes de Curto-Circuito em Redes Trifásicas*, 5 ed., São Paulo, Editora Pedagógica e Universitária Ltda.

Silva, G. P., 2000, *Danos por Fadiga em Material Compósito Pultrudado de Fibras de Vidro e Matriz Polimérica*, Dissertação de Mestrado, Programa de Pós-Graduação da REDEMAT, Universidade Federal de Ouro Preto, Ouro Preto, MG, Brasil.

Smith, C. B, 1998, *Fundamentos da Pultrusão*, site: www.wpp.com.br.

The Institute of Electrical and Electronics Engineers, 1998, *IEEE Guide for Design of Substation Rigid-Bus Structures*.

Vilela, L.,1994, *Dimensionamento de Barramentos Tubulares para Subestações*, Belo Horizonte.

Sites Visitados:

NIST's Advanced Technology Program (ATP), home page, http://www.nist.gov/public_affairs/factsheet/ebert2.htm.

Strongwell Ebert LLC, home Page, <http://www.strongwell-ebert.com/>.

Pultrusion Industry Council, Composites Fabricators Association (CFA), home page <http://www.cfa-hq.org/pic/products/features.htm>.

APÊNDICE B

Memória de Cálculos

B.1) Cálculo de Cargas e Momentos

B.1.1) Considerações iniciais

Para o cálculo das cargas a serem aplicadas no MEF, fixaram-se algumas condições:

- localização da linha: estado de Minas Gerais;
- classificação do terreno quanto à rugosidade: B implicando em $K_r = 1,0$ (Tab. 3.4) e $K_d = 1,4$ (Fig. 3.11);
- altura (ALT): 800 m (MICHALANY *et al*, 1985);
- $t_c = 14^\circ\text{C}$ (Fig. 3.12);
- $V_b = 22\text{m/s}$ (Fig. 3.10);
- para terreno tipo B: $n = 12$ para suporte e isoladores e $n = 11$ para condutores (Tab. 3.3).

Adotou-se, também, uma convenção de sinais para forças e momentos conforme representação da Figura B.1. Tem-se momentos positivos para Sentido Anti-horário (SA) e momentos negativos para Sentido Horário (SH).

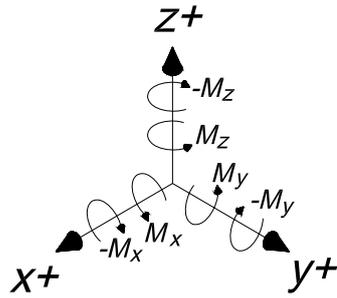


Figura B.1 - Convenção de sinais para forças e momentos

B.1.2) Determinação da densidade

Utilizando-se a Equação 2.3:

$$\rho = \frac{1,293}{1 + 0,00367.t_c} \left(\frac{16000 + 64.t_c - ALT}{16000 + 64.t_c + ALT} \right) \quad (3.3)$$

$$\rho = \frac{1,293}{1 + 0,00367.14} \left(\frac{16000 + 64.14 - 800}{16000 + 64.14 + 800} \right) \quad (B.1)$$

$$\rho = 1,119 \text{ kg / m}^3 \quad (B.2)$$

B.1.2.1) Equações da pressão específica em função da altura

Utilizando-se a Equação 3.2:

$$V_P = K_r K_d \left(\frac{H}{10} \right)^{1/n} V_T \quad (3.2)$$

e substituindo os valores especificados em B.1.1 obtém-se (Eqs. B.3 e B.4):

$$V_P = 1,0.1,4 \left(\frac{H}{10} \right)^{1/12} 22 \quad (B.3)$$

$$V_P = 30,80 \left(\frac{H}{10} \right)^{1/12} \quad (B.4)$$

Substituindo o valor da densidade (B.2) e a Equação B.4 na Equação 3.4:

$$q_o = \frac{1}{2} \rho V_p^2 \quad (3.4)$$

expressa-se a pressão específica como uma função da altura (Eq. B.5):

$$q_o = 530,76 \left(\frac{H}{10} \right)^{\frac{1}{6}} \quad (B.5)$$

Uma outra equação (Eq. B.6) pode ser também determinada a partir dos mesmos princípios ao considerar a variável $n = 11$ para condutores (Norma NBR 5422/1985):

$$q_o = 530,76 \left(\frac{H}{10} \right)^{\frac{1}{5,5}} \quad (B.6)$$

B.1.3) Cálculo de cargas e momentos nos acessórios

A Equação 3.5 define o valor da força de vento em isoladores:

$$A_i = q_o \cdot C_{xi} \cdot S_i \quad (3.5)$$

Como a Norma NBR 5422/1985 define $C_{xi} = 1,20$, a Equação 3.5 torna-se (Eq. B.7):

$$q_o = 636,91 \left(\frac{H}{10} \right)^{\frac{1}{6}} \cdot S_i \quad (B.7)$$

Isolador de 13,8 kV

Dados:

- dimensões básicas: 150 x 200 mm;
- peso: 8,5 kgf (83,39 N);
- Para altura em relação ao solo $H = 5205\text{mm}$ (Eq. B.8)

$$A_i = 636,91 \left(\frac{5,205}{10} \right)^{\frac{1}{6}} (0,20 \times 0,15) \quad (B.8)$$

$$A_{ix} = -17,14 \text{ N} \quad (B.9)$$

$$A_{iy} = 17,14 \text{ N} \quad (B.10)$$

Para o cálculo de momentos (Eq. B.11):

$$M_x = M_y = 17,14 \times 0,075 = 1,29 \text{ Nm (SA)} \quad (\text{B.11})$$

A Figura B.1 explicita os sentidos das forças de vento e dos momentos atuantes no isolador de 13,8 kV.

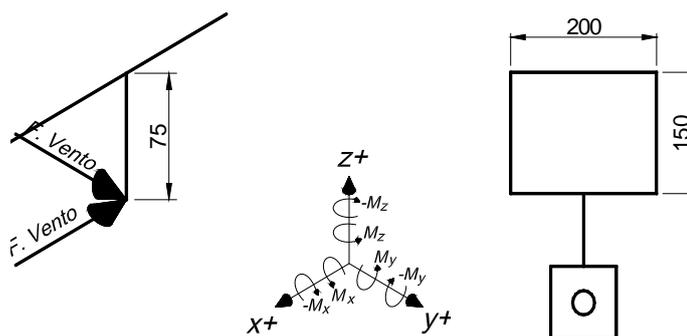


Figura B.2 – Representação das forças e momentos atuantes nos isoladores de 13,8 kV do Banco de Capacitores

Isolador de pedestal 34,5 kV

Dados:

- Dimensões básicas: 200 x 330 mm;
- peso: 20 kgf (196,20 N);
- altura em relação ao solo (H): 3090 mm.
- Para altura em relação ao solo $H = 3090$ mm (Eq. B.12):

$$A_i = 636,91 \left(\frac{3,090}{10} \right)^{\frac{1}{6}} (0,20 \times 0,33) \quad (\text{B.12})$$

$$A_{ix} = -34,56 \text{ N} \quad (\text{B.13})$$

$$A_{iy} = 34,56 \text{ N} \quad (\text{B.14})$$

Pára-raios

Dados:

- dimensões básicas: 130x330mm;
- peso: 5kgf (49,05N);
- altura em relação ao solo:
- Para altura em relação ao solo $H_1 = 3705\text{mm}$ (Eq. B.15):

$$A_{pr} = 636,91 \left(\frac{3,705}{10} \right)^{\frac{1}{6}} (0,13 \times 0,33) \quad (\text{B.15})$$

$$A_{prx} = -23,16\text{N} \quad (\text{B.16})$$

$$A_{pry} = 23,16\text{N} \quad (\text{B.17})$$

Para o cálculo de momentos (Eqs. B.18, B.19 e B.20):

$$M_x = 49,05 \times 0,225 = -11,04\text{Nm (SH)} \quad (\text{B.18})$$

$$M_y = 23,16 \times 0,135 = -3,13\text{Nm (SH)} \Rightarrow 3,13\text{Nm (SA)} \text{ (para o ponto "A")} \quad (\text{B.19})$$

$$M_z = 23,16 \times 0,225 = 5,21 \text{ (SA)} \quad (\text{B.20})$$

- Para altura em relação ao solo $H_2 = 4260 \text{ mm}$ (Eq. B.21):

$$A_{pr} = 636,91 \left(\frac{4,260}{10} \right)^{\frac{1}{6}} (0,13 \times 0,33) \quad (\text{B.21})$$

$$A_{prx} = -23,70 \text{ N} \quad (\text{B.22})$$

$$A_{pry} = 23,70 \text{ N} \quad (\text{B.23})$$

Para o cálculo de momentos (Eq. B.24, B.25 e B.26):

$$M_x = 49,05 \times 0,225 = -11,04\text{Nm (SH)} \quad (\text{B.24})$$

$$M_y = 23,70 \times 0,135 = -3,20\text{Nm (SH)} \Rightarrow 3,20\text{Nm (SA)} \text{ (para o ponto "A")} \quad (\text{B.25})$$

$$M_z = 23,70 \times 0,225 = 5,33 \text{ (SA)} \quad (\text{B.26})$$

- Para altura em relação ao solo $H_3 = 4815 \text{ mm}$ (Eq. B.27)

$$A_{pr} = 636,91 \left(\frac{4,815}{10} \right)^{\frac{1}{6}} (0,13 \times 0,33) \quad (\text{B.27})$$

$$A_{prx} = -24,19 \text{ N} \quad (\text{B.28})$$

$$A_{pry} = 24,19 \text{ N} \quad (\text{B.29})$$

Para o cálculo de momentos (Eqs. B.30, B.31 e B.32):

$$M_x = 49,05 \times 0,225 = -11,04 \text{ Nm (SH)} \quad (\text{B.30})$$

$$M_y = 24,19 \times 0,135 = -3,27 \text{ Nm (SH)} \Rightarrow 3,27 \text{ Nm (SA)} \quad (\text{para o ponto "A"}) \quad (\text{B.31})$$

$$M_z = 24,19 \times 0,225 = 5,44 \text{ (SA)} \quad (\text{B.32})$$

As dimensões, forças e momentos atuantes em uma pára-raio são apresentadas na Figura B.3-a e B.3-b respectivamente.

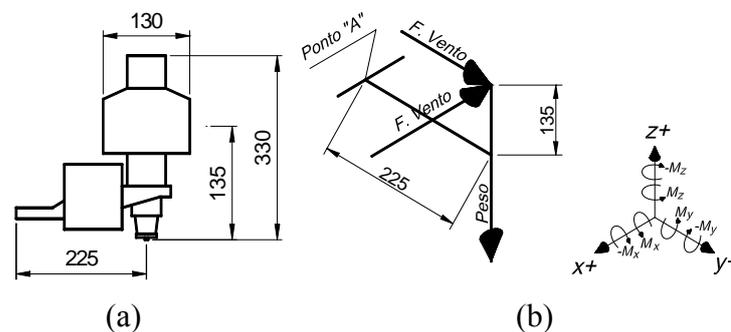


Figura B.3 – Representação das forças e momentos atuantes nos pára-raios

Transformador de corrente

Dados:

- dimensões: 350 x 400 mm;
- peso: 62 kg (608,22 N);
- Para altura em relação ao solo $H = 2865$ mm (Eq. B.33):

$$A_{tc} = 636,91 \left(\frac{2,865}{10} \right)^{\frac{1}{6}} (0,35 \times 0,40) \quad (\text{B.33})$$

$$A_{tcx} = -72,40 \text{ N} \quad (\text{B.34})$$

$$\frac{A_{tcx}}{4} = -18,10 \text{ N} \quad (\text{B.35})$$

$$A_{tcy} = 72,40 \text{ N} \quad (\text{B.36})$$

$$\frac{A_{tcy}}{4} = 18,10 \text{ N} \quad (\text{B.37})$$

$$M_x = 18,10 \times 0,20 = -3,62 \text{ Nm (SH)} \quad (\text{B.38})$$

$$M_y = 18,10 \times 0,20 = -3,62 \text{ Nm (SH)} \quad (\text{B.39})$$

Considerando quatro pontos de fixação (aplicação de forças no MEF), como apresentados na Figura B.4.

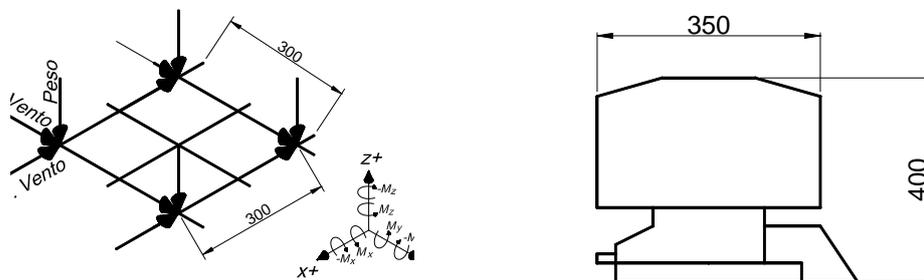


Figura B.4 – Aplicação de forças e momentos atuantes no transformador de corrente

Capacitor

Dados:

- dimensões: 350 x 850 mm (lateral) e 250 x 350 (frontal);
- peso: 82 Kg (804,42 N) $\Rightarrow A_{cz} = -804,42 \text{ N} \Rightarrow \frac{A_{cz}}{3} = -268,14 \text{ N}$
- Para altura em relação ao solo $H_1 = 3615 \text{ mm}$ (Eqs. B.40 e B.42):

$$A_c = 530,76 \left(\frac{3,615}{10} \right)^{\frac{1}{6}} (0,35 \times 0,85) \quad (\text{B.40})$$

$$A_{cx} = -133,27 \text{ N} \Rightarrow \frac{A_{cx}}{3} = -44,42 \text{ N} \quad (\text{B.41})$$

$$A_c = 530,76 \left(\frac{3,615}{10} \right)^{\frac{1}{6}} (0,25 \times 0,35) \quad (\text{B.42})$$

$$A_{cy} = 39,20 \text{ N} \Rightarrow \frac{A_{cy}}{3} = 13,07 \text{ N} \quad (\text{B.43})$$

Para o cálculo de momentos (Eqs B.44 e B.45)

$$M_x = 39,20 \times 0,175 = -6,86 \text{ Nm (SH)} \Rightarrow \frac{M_x}{3} = -2,29 \text{ Nm} \quad (\text{B.44})$$

$$M_y = 133,27 \times 0,175 = -23,32 \text{ Nm (SH)} \Rightarrow \frac{M_y}{3} = -7,77 \text{ Nm} \quad (\text{B.45})$$

- Para altura em relação ao solo $H_2 = 4065 \text{ mm}$ (Eqs. B.46 e B.48):

$$A_c = 530,76 \left(\frac{4,065}{10} \right)^{\frac{1}{6}} (0,35 \times 0,85) \quad (\text{B.46})$$

$$A_{cx} = -135,90 \text{ N} \Rightarrow \frac{A_{cx}}{3} = -45,30 \text{ N} \quad (\text{B.47})$$

$$A_c = 530,76 \left(\frac{4,065}{10} \right)^{\frac{1}{6}} (0,25 \times 0,35) \quad (\text{B.48})$$

$$A_{cy} = 39,97 \text{ N} \Rightarrow \frac{A_{cy}}{3} = 13,32 \text{ N} \quad (\text{B.49})$$

Para o cálculo de momentos (Eqs. B.50 e B.51):

$$M_x = 39,97 \times 0,175 = -6,99 \text{ Nm (SH)} \Rightarrow \frac{M_x}{3} = -2,33 \text{ Nm} \quad (\text{B.50})$$

$$M_y = 135,90 \times 0,175 = -23,78 \text{ Nm (SH)} \Rightarrow \frac{M_y}{3} = -7,93 \text{ Nm} \quad (\text{B.51})$$

- Para altura em relação ao solo $H_3 = 4560 \text{ mm}$ (Eqs. B.52 e B.54):

$$A_c = 530,76 \left(\frac{4,560}{10} \right)^{\frac{1}{6}} (0,35 \times 0,85) \quad (\text{B.52})$$

$$A_{cx} = -138,53 \text{ N} \Rightarrow \frac{A_{cx}}{3} = -47,18 \text{ N} \quad (\text{B.53})$$

$$A_c = 530,76 \left(\frac{4,560}{10} \right)^{\frac{1}{6}} (0,25 \times 0,35) \quad (\text{B.54})$$

$$A_{cy} = 40,74 \text{ N} \Rightarrow \frac{A_{cy}}{3} = 13,58 \text{ N} \quad (\text{B.55})$$

Para o cálculo de momentos (Eqs. B.56 e B.57):

$$M_x = 40,74 \times 0,175 = -7,13 \text{ Nm (SH)} \Rightarrow \frac{M_x}{3} = -2,38 \text{ Nm} \quad (\text{B.56})$$

$$M_y = 138,53 \times 0,175 = -24,42 \text{ Nm (SH)} \Rightarrow \frac{M_y}{3} = -8,14 \text{ Nm} \quad (\text{B.57})$$

A Figura B.5 ilustra a distribuição de forças para os capacitores

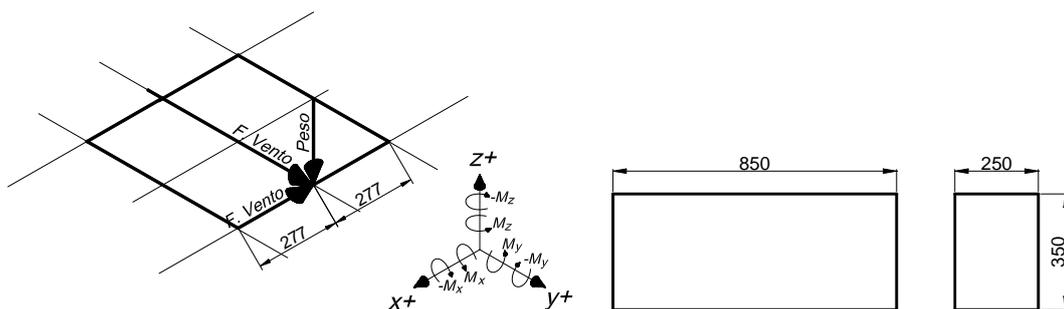


Figura B.5 – Aplicação de forças de capacitores

B.1.4) Cálculo de cargas no suporte

Para suportes metálicos treliçados de seção transversal retangular, o esforço devido à ação do vento é dado por (Eq. 3.6):

$$A_t = q_o (1 + 0,2 \cdot \text{sen}^2 2\theta) (S_{T1} \cdot C_{xT1} \cdot \text{sen}^2 \theta + S_{T2} \cdot C_{xT2} \cdot \text{cos}^2 \theta) \quad (3.6)$$

A Figura B.6 esquematiza a orientação das faces do Banco de Capacitores.

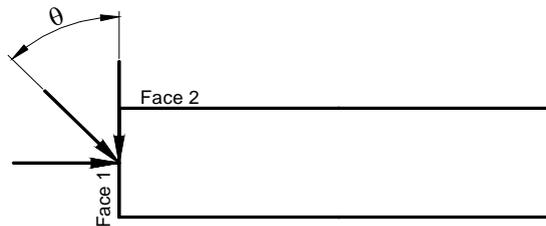


Figura B.6 – Representação simplificada da vista superior do Banco de Capacitores

As áreas calculadas para cada fase são:

- área líquida do suporte: 3,36 m² (Fig. B.7-a);
- área bruta do suporte: 12,22 m² (Fig. B.7-b)

Para a determinação de C_{xT1} e C_{xT2} define-se, inicialmente, a relação entre as áreas líquida e bruta do suporte (Eq. B.58) definida por:

$$\phi = \frac{3,36}{12,22} \cong 0,27 \quad (B.58)$$

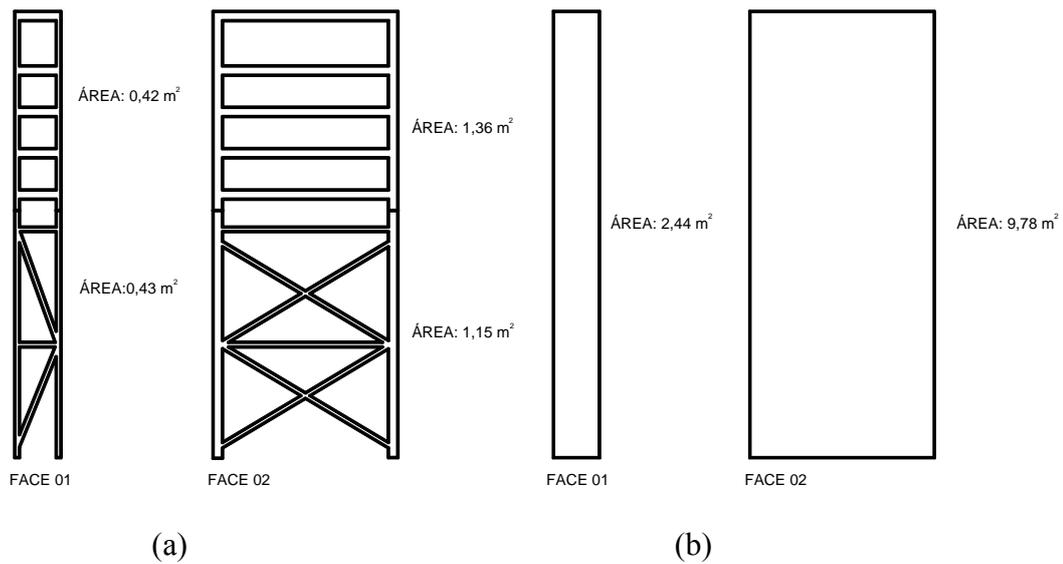


Figura B.7 – (a) Área útil do Banco de Capacitores; (b) Área bruta do Banco de Capacitores

Utilizando-se o ábaco (Fig. 3.13), obtém-se:

$$C_{XT1} = C_{XT2} = 2,60 \quad (\text{B.59})$$

Para altura $H = 5300$ mm, tem-se para $\theta = 14^\circ$ o maior valor da força de vento para o Banco de Capacitores (Fig. B.8). Da Equação 3.6 e adotando os valores adequados (Eq. B.60):

$$A_t = 530,76 \left(\frac{H}{10} \right)^6 \left[1 + 0,2 \sin^2 2(14) \right] \left[0,85 \cdot 2,60 \cdot \sin^2(14) + 2,51 \cdot 2,60 \cdot \cos^2(14) \right] \quad (\text{B.60})$$

obtêm-se:

$$A_t = 3127,38N \quad (\text{B.61})$$

- Para a face 1: $A_{t1} = 3127,38x \sin(14) = 756,58N \quad (\text{B.62})$

- Para a face 2 $A_{t2} = 3127,38x \cos(14) = 3034,48N \quad (\text{B.63})$

Força de Vento pela Variação de Ângulo (para o BC)

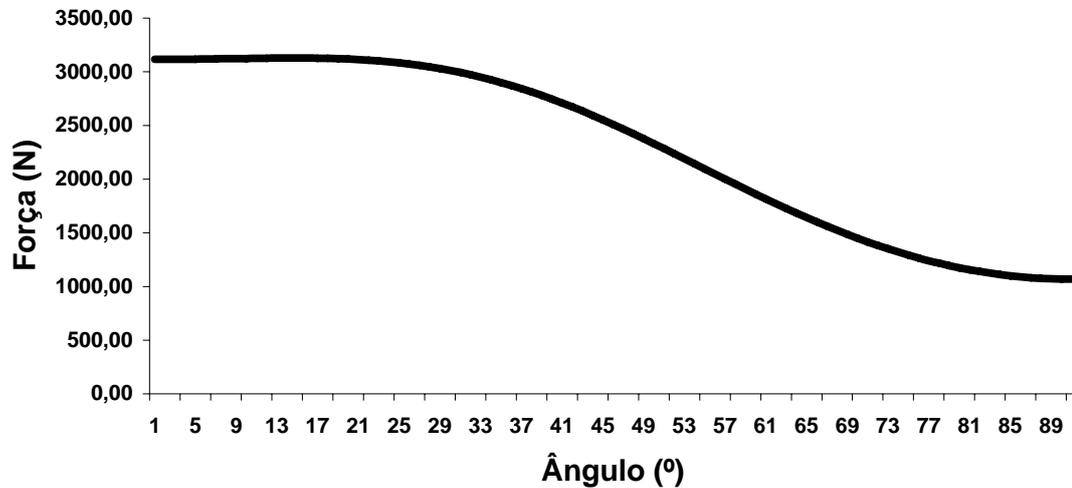


Figura B.8 – Variação da força de vento pelo ângulo de incidência para o Banco de Capacitores

B.1.5) Cálculo de cargas e momentos nos barramentos

Os barramentos têm peso equivalente a 1,508 kgf / m (14,79 N / m). Os aspectos dimensionais levando em consideração para cálculo de esforços em barramentos podem ser verificados na Figura B.9.

Esforço nos barramentos devido ao vento

Utilizando-se a Equação (3.8)

$$A_c = q_o C_{xc} \alpha d \frac{Z}{2} \text{sen}^2 \theta \quad (3.8)$$

e considerando:

- $C_{xc} = 1,0$;
- $\alpha = 1,0$;
- $d = 48,64 \times 10^{-3} \text{ m}$
- $n = 5,5$;
- $\theta = 0^\circ$;

- $H = 4980 \text{ mm}$.

Obtém-se a Equação B.65.

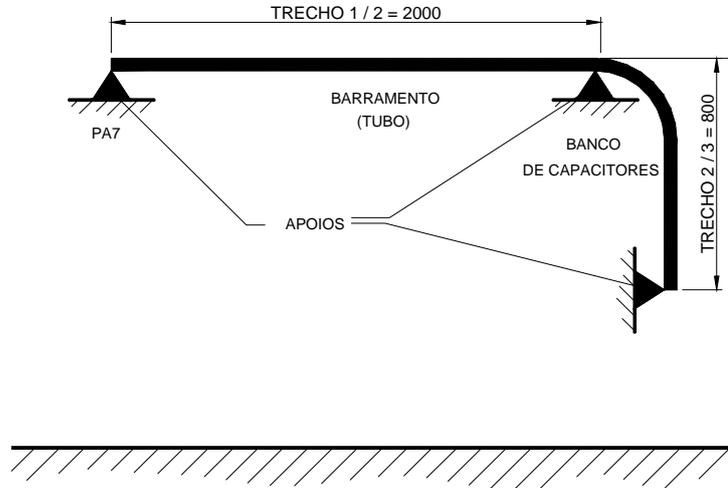


Figura B.9 – Dimensões consideradas no cálculo dos esforços nos barramentos

$$A_i = 530,76 \left(\frac{4,98}{10} \right)^{5,5} (1) \cdot (1) (48,64 \times 10^{-3}) \left(\frac{Z}{2} \right) \text{sen}^2(90) \quad (\text{B.64})$$

$$A_i = 11,37 \cdot (Z) \quad (\text{B.65})$$

Esforço nos barramentos devido ao fenômeno de curto-circuito

Retomando a Equação (3.9):

$$\frac{F}{L} = \frac{\mu_0 I \cdot I'}{2\pi d} \quad (3.9)$$

onde :

- $I_{CC} = 10000 \text{ A}$;
- $d = 0,50 \text{ m}$;
- $\mu_0 = 2,0 \times 10^{-7} \text{ H.m}^{-1}$;

considera-se os seguintes casos de estudo:

Caso 1

$$I_A = \sqrt{2} I_{CC}$$

$$I_B = 2\sqrt{2}I_{CC}$$

$$I_C = \sqrt{2}I_{CC}$$

Fase A

$$P_{CA} = F_{BA} - F_{CA} \Rightarrow 2 \times 10^{-7} \left(\frac{I_A I_B}{0,50} - \frac{I_A I_C}{1,00} \right) = 120,00 N / m \quad (\text{B.66})$$

- Trecho 1/2 = 2,00 m (divide-se por 2 apoios)

$$P_{CA1/2} = \left(\frac{120,00}{2} - 11,37 \right) \cdot 2m = 97,26 N \quad (\text{B.67})$$

- Trecho 2/3 = 0,80 m (divide-se por 2 apoios)

$$P_{CA2/3} = \left(\frac{120,00}{2} - 11,37 \right) \cdot 0,80m = 38,90 N \quad (\text{B.68})$$

$$A_{ix} = -17,14 N \quad (\text{B.9})$$

$$P_{CA1/2} + P_{CA2/3} + A_{iv} = 119,02 N \quad (\text{B.69})$$

- Momentos:

Por vento e curto-circuito nos barramentos:

$$M_Y = (97,26 + 38,90) \times 0,33 = 44,93 Nm \quad (\text{S.A.}) \quad (\text{B.70})$$

Momento no ponto de fixação do isolador:

$$M_x = M_Y = 1,29 Nm \quad (\text{S.A.}) \quad (\text{B.11})$$

$$M_{ytotal} = 44,93 + 1,29 = 46,22 Nm \quad (\text{S.A.}) \quad (\text{B.71})$$

Fase B

$$P_{CB} = F_{CB} - F_{AB} \Rightarrow 2 \times 10^{-7} \left(\frac{I_C I_B}{0,50} - \frac{I_A I_B}{0,50} \right) = 0,00 N / m \quad (\text{B.72})$$

- Trecho 1/2 = 2,00 m (divide-se por 2 apoios)

$$P_{CB1/2} = \left(\frac{0}{2} - 11,37 \right) \cdot 2m = -22,74N \quad (\text{B.73})$$

- Trecho 2/3 = 0,80 m (divide-se por 2 apoios)

$$P_{CB2/3} = \left(\frac{0}{2} - 11,37 \right) \cdot 0,80m = -9,10N \quad (\text{B.74})$$

$$A_{ix} = -17,14 N \quad (\text{B.9})$$

$$P_{CB1/2} + P_{CB2/3} + A_{ix} = -48,98N \quad (\text{B.75})$$

- Momentos:

Por vento e curto-circuito nos barramentos:

$$M_Y = (-22,74 - 9,10) \cdot 0,33 = -10,51Nm \quad (\text{S.H.}) \quad (\text{B.76})$$

Momento no ponto de fixação do isolador:

$$M_x = M_Y = 1,29Nm \quad (\text{S.A.}) \quad (\text{B.11})$$

$$M_{ytotal} = -10,51 + 1,29 = -9,22Nm \quad (\text{S.H.}) \quad (\text{B.77})$$

Fase C

$$P_{CC} = F_{AC} - F_{BC} \Rightarrow 2 \times 10^{-7} \left(\frac{I_A I_C}{1,00} - \frac{I_B I_C}{0,5} \right) = -120,00N / m \quad (\text{B.78})$$

- Trecho 1/2 = 2,00 m (divide-se por 2 apoios)

$$P_{CC1/2} = \left(\frac{-120,00}{2} - 11,37 \right) \cdot 2m = -142,74N \quad (\text{B.79})$$

- Trecho 2/3 = 0,80 m (divide-se por 2 apoios)

$$P_{CC2/3} = \left(\frac{-120,00}{2} - 11,37 \right) \cdot 0,80m = -57,10N \quad (\text{B.80})$$

$$A_{ix} = -17,14 N \quad (\text{B.9})$$

$$P_{CA1/2} + P_{CA2/3} + A_{ix} = -216,98N \quad (\text{B.81})$$

- Momentos:

Por vento e curto-circuito nos barramentos:

$$M_Y = (-142,74 - 57,10) \times 0,33 = -65,95 Nm \quad (\text{S.H.}) \quad (\text{B.82})$$

Momento no ponto de fixação do isolador:

$$M_x = M_Y = 1,29 Nm \quad (\text{S.A.}) \quad (\text{B.11})$$

$$M_{\text{total}} = -65,95 + 1,29 = -64,66 Nm \quad (\text{S.H.}) \quad (\text{B.83})$$

a) Caso 02

$$I_A = \sqrt{2} I_{CC}$$

$$I_B = \sqrt{2} I_{CC}$$

$$I_C = 2\sqrt{2} I_{CC}$$

Fase A

$$P_{CA} = -F_{BA} + F_{CA} \Rightarrow 2 \times 10^{-7} \left(-\frac{I_B I_A}{0,50} + \frac{I_C I_A}{1,00} \right) = 0,00 N/m \quad (\text{B.84})$$

- Trecho 1/2 = 2,00 m (divide-se por 2 apoios)

$$P_{CA1/2} = \left(\frac{0,00}{2} - 11,37 \right) \cdot 2m = -22,74 N \quad (\text{B.85})$$

- Trecho 2/3 = 0,80 m (divide-se por 2 apoios)

$$P_{CA2/3} = \left(\frac{0,00}{2} - 11,37 \right) \cdot 0,80m = -9,10 N \quad (\text{B.86})$$

$$A_{ix} = -17,14 N \quad (\text{B.9})$$

$$P_{CA1/2} + P_{CA2/3} + A_{ix} = -48,98 N \quad (\text{B.87})$$

- Momentos:

Por vento e curto-circuito nos barramentos:

$$M_Y = (-22,74 - 9,10) \times 0,33 = -10,51 Nm \quad (\text{S.H.}) \quad (\text{B.88})$$

Momento no ponto de fixação do isolador:

$$M_x = M_y = 1,29 Nm \quad (\text{S.A.}) \quad (\text{B.11})$$

$$M_{ytotal} = -10,51 + 1,29 = -9,22 Nm \quad (\text{S.H.}) \quad (\text{B.89})$$

Fase B

$$P_{CB} = F_{CB} + F_{AB} \Rightarrow 2 \times 10^{-7} \left(\frac{I_C I_B}{0,50} + \frac{I_A I_B}{0,5} \right) = 240,00 N / m \quad (\text{B.90})$$

- Trecho 1/2 = 2,00 m (divide-se por 2 apoios)

$$P_{CB1/2} = \left(\frac{240,00}{2} - 11,37 \right) \cdot 2m = 217,26 N \quad (\text{B.91})$$

- Trecho 2/3 = 0,80 m (divide-se por 2 apoios)

$$P_{CB2/3} = \left(\frac{240,00}{2} - 11,37 \right) \cdot 0,80m = 86,90 N \quad (\text{B.92})$$

$$A_{ix} = -17,14 N \quad (\text{B.9})$$

$$P_{CB1/2} + P_{CB2/3} + A_{ix} = 287,02 N \quad (\text{B.93})$$

- Momentos:

Por vento e curto-circuito nos barramentos:

$$M_y = (217,26 + 86,90) \times 0,33 = 100,37 Nm \quad (\text{S.A.}) \quad (\text{B.94})$$

Momento no ponto de fixação do isolador:

$$M_x = M_y = 1,29 Nm \quad (\text{S.A.}) \quad (\text{B.11})$$

$$M_{ytotal} = 100,37 + 1,29 = 101,66 Nm \quad (\text{S.A.}) \quad (\text{B.95})$$

Fase C

$$P_{CC} = -F_{BC} - F_{AC} \Rightarrow 2 \times 10^{-7} \left(-\frac{I_B I_C}{0,50} - \frac{I_A I_C}{1,00} \right) = -240,00 N / m \quad (\text{B.96})$$

- Trecho 1/2 = 2,00 m (divide-se por 2 apoios)

$$P_{CC1/2} = \left(\frac{-240,00}{2} - 11,37 \right) \cdot 2m = -262,74N \quad (\text{B.97})$$

- Trecho 2/3 = 0,80 m (divide-se por 2 apoios)

$$P_{CC2/3} = \left(\frac{-240,00}{2} - 11,37 \right) \cdot 0,80m = -105,10N \quad (\text{B.98})$$

$$A_{ix} = -17,14 N \quad (\text{B.9})$$

$$P_{CA1/2} + P_{CA2/3} + A_{ix} = -384,98N \quad (\text{B.99})$$

- Momentos:

Por vento e curto-circuito nos barramentos:

$$M_Y = (-262,74 - 105,10) \cdot 0,33 = -121,39Nm \quad (\text{S.H.}) \quad (\text{B.100})$$

Momento no ponto de fixação do isolador:

$$M_x = M_Y = 1,29Nm \quad (\text{S.A.}) \quad (\text{B.11})$$

$$M_{ytotal} = -121,39 + 1,29 = -120,10Nm \quad (\text{S.H.}) \quad (\text{B.101})$$

b) Caso 03

$$I_A = 2\sqrt{2}I_{CC}$$

$$I_B = \sqrt{2}I_{CC}$$

$$I_C = \sqrt{2}I_{CC}$$

Fase A

$$P_{CA} = F_{BA} + F_{CA} \Rightarrow 2 \times 10^{-7} \left(\frac{I_B I_A}{0,50} + \frac{I_C I_A}{1,00} \right) = 240,00N / m \quad (\text{B.102})$$

- Trecho 1/2 = 2,00 m (divide-se por 2 apoios)

$$P_{CA1/2} = \left(\frac{240,00}{2} - 11,37 \right) \cdot 2m = 217,26N \quad (\text{B.103})$$

- Trecho 2/3 = 0,80 m (divide-se por 2 apoios)

$$P_{CA2/3} = \left(\frac{240,00}{2} - 11,37 \right) \cdot 0,80m = 86,90N \quad (\text{B.104})$$

$$A_{ix} = -17,14 N \quad (\text{B.9})$$

$$P_{CA1/2} + P_{CA2/3} + A_{ix} = 287,02N \quad (\text{B.105})$$

- Momentos:

Por vento e curto-circuito nos barramentos:

$$M_Y = (217,26 + 86,90) \cdot 0,33 = 100,37Nm \quad (\text{S.A.}) \quad (\text{B.106})$$

Momento no ponto de fixação do isolador:

$$M_x = M_Y = 1,29Nm \quad (\text{S.A.}) \quad (\text{B.11})$$

$$M_{ytotal} = 100,37 + 1,29 = 101,66Nm \quad (\text{S.A.}) \quad (\text{B.107})$$

Fase B

$$P_{CB} = -F_{CB} - F_{AB} \Rightarrow 2 \times 10^{-7} \left(-\frac{I_C I_B}{0,50} - \frac{I_A I_B}{0,5} \right) = -240,00N/m \quad (\text{B.108})$$

- Trecho 1/2 = 2,00 m (divide-se por 2 apoios)

$$P_{CB1/2} = \left(\frac{-240,00}{2} - 11,37 \right) \cdot 2m = -262,74N \quad (\text{B.109})$$

- Trecho 2/3 = 0,80 m (divide-se por 2 apoios)

$$P_{CB2/3} = \left(\frac{-240,00}{2} - 11,37 \right) \cdot 0,80m = -105,10N \quad (\text{B.110})$$

$$A_{ix} = -17,14 N \quad (\text{B.9})$$

$$P_{CB1/2} + P_{CB2/3} + A_{ix} = -384,98N \quad (\text{B.111})$$

- Momentos:

Por vento e curto-circuito nos barramentos:

$$M_Y = (-262,74 - 105,10) \times 0,33 = -121,39 Nm \quad (\text{S.H.}) \quad (\text{B.112})$$

Momento no ponto de fixação do isolador:

$$M_x = M_Y = 1,29 Nm \quad (\text{S.A.}) \quad (\text{B.11})$$

$$M_{ytotal} = -121,39 + 1,29 = -120,10 Nm \quad (\text{S.H.}) \quad (\text{B.113})$$

Fase C

$$P_{CC} = -F_{AC} + F_{BC} \Rightarrow 2 \times 10^{-7} \left(-\frac{I_A I_C}{1,00} + \frac{I_B I_C}{0,5} \right) = 0,00 N/m \quad (\text{B.114})$$

- Trecho 1/2 = 2,00 m (divide-se por 2 apoios)

$$P_{CC1/2} = \left(\frac{0,00}{2} - 11,37 \right) \cdot 2m = -22,74 N \quad (\text{B.115})$$

- Trecho 2/3 = 0,80 m (divide-se por 2 apoios)

$$P_{CC2/3} = \left(\frac{0,00}{2} - 11,37 \right) \cdot 0,80m = -9,10 N \quad (\text{B.116})$$

$$A_{ix} = -17,14 N \quad (\text{B.9})$$

$$P_{CA1/2} + P_{CA2/3} + A_{ix} = -48,98 N \quad (\text{B.117})$$

- Momentos:

Por vento e curto-circuito nos barramentos:

$$M_Y = (-22,74 - 9,10) \times 0,33 = -10,51 Nm \quad (\text{S.H.}) \quad (\text{B.118})$$

Momento no ponto de fixação do isolador:

$$M_x = M_Y = 1,29 Nm \quad (\text{S.A.}) \quad (\text{B.11})$$

$$M_{ytotal} = -10,51 + 1,29 = -9,22 Nm \quad (\text{S.H.}) \quad (\text{B.119})$$

