

MINISTÉRIO DA EDUCAÇÃO
UNIVERSIDADE FEDERAL DO RIO GRANDE DO SUL
Escola de Engenharia

Programa de Pós Graduação em Engenharia de Minas, Metalúrgica e de Materiais.

PPGE3M

**ANÁLISE ESTRUTURAL PELO MÉTODO DE ELEMENTOS FINITOS DE
MASTRO DA SONDA DE PERFURAÇÃO/PRODUÇÃO DE POÇOS DE PETRÓLEO**

DIEGO RIZZOTTO ROSSETTO

DISSERTAÇÃO PARA OBTENÇÃO DO TÍTULO DE MESTRE
em Engenharia

Porto Alegre
Ano 2013

MINISTÉRIO DA EDUCAÇÃO
UNIVERSIDADE FEDERAL DO RIO GRANDE DO SUL
Escola de Engenharia

Programa de Pós Graduação em Engenharia de Minas, Metalúrgica e de Materiais.

PPGE3M

**ANÁLISE ESTRUTURAL PELO MÉTODO DE ELEMENTOS FINITOS DE
MASTRO DA SONDA DE PERFURAÇÃO/PRODUÇÃO DE POÇOS DE PETRÓLEO**

DIEGO RIZZOTTO ROSSETTO

Engenheiro Mecânico

Trabalho realizado no Departamento de Metalurgia da Escola de Engenharia da UFRGS, dentro do Programa de Pós-Graduação em Engenharia de Minas, Metalúrgica e de Materiais – PPGE3M, como parte dos requisitos para obtenção do título de Mestre em Engenharia.

Área de Concentração: Ciência e Tecnologia dos Materiais

Porto Alegre
2013

Esta dissertação foi julgada adequada para obtenção do título de Mestre em Engenharia, área de concentração em Ciência e Tecnologia dos Materiais, e aprovada em sua forma final, pelo orientador e pela Banca Examinadora do Programa de Pós-Graduação.

Orientador: Prof. Dr. Telmo Roberto Strohaecker

Banca Examinadora:

Prof. Dr. Antônio Fernando Burket Bueno, IFRS

Prof. Dr. Thomas Gabriel Rosauo Clarke, PPGE3M/UFRGS

Prof. Dr. Toni Roger Schifelhain de Lima, FAURGS

Prof. Dr. Telmo Roberto Strohaecker
Coordenador do PPGEM

DEDICATÓRIA

A Deus por ter me dado forças e inspiração nos momentos de maior dificuldade.

A minha Família e minha Esposa, por acreditarem em mim e pelo apoio, incentivo e inspiração para realização deste trabalho.

AGRADECIMENTOS

Aos meus pais Caetano e Terezinha, pelo imenso apoio, amor, dedicação e incentivo.

A minha esposa Claudia pela compreensão e apoio nos momentos de maiores dificuldades.

As minhas irmãs Diane e Daísa, pelo incentivo e apoio.

Ao Professor Dr. Telmo Roberto Strohaecker, pela confiança, amizade, apoio e ensinamentos valiosos que contribuíram para a realização deste estudo.

Ao Eng. Mauro Costa, que sempre incentivou a continuidade dos estudos, como forma de sucesso para desenvolvimento pessoal e profissional.

Ao Eng. Leonardo Beck, pela troca de informações e ajuda prestada durante o desenvolvimento do trabalho.

Aos Mestres e Doutores, pelos ensinamentos transmitidos no decorrer de todo o curso.

Aos amigos e colegas de trabalho pela troca de experiência, amizade e ajuda prestada.

A todos que de alguma forma auxiliaram na realização deste trabalho, seja através de orientação técnica e científica, ou prestando apoio e amizade.

SUMÁRIO

Página

AGRADECIMENTOS	5
LISTA DE TABELAS	12
LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS	13
RESUMO.....	14
ABSTRACT	15
1 INTRODUÇÃO	16
1.1 OBJETIVOS	18
1.2 OBJETIVOS ESPECÍFICOS	19
2 REVISÃO DA LITERATURA	20
2.1 OPERAÇÃO DE WORKOVER	20
2.2 SONDA DE PRODUÇÃO TERRESTRE.....	20
2.2.1 Sistema de Sustentação de Cargas.....	20
2.2.2 Torre ou mastro	20
2.2.3 Subestruturas	22
2.2.4 Estaleiro.....	22
2.2.5 Sistema de Movimentação de Cargas.....	23
2.3 A NORMA API SPEC 4F – 3º EDIÇÃO: 2008.....	24
2.3.1 Cargas de Projeto.....	24
2.3.2 Especificações de Projeto	25
2.3.3 Carregamentos de Operação.....	25
2.3.4 Carregamento devido Ação do Vento	25
2.4 AISC 360-10 – CAPÍTULO B ITEM 4 – DESIGN FOR STRENGHT USING ALLOWABLE STRENGHT DESIGN (ASD)	26
2.5 ELEMENTOS FINITOS	28
3 MATERIAIS E MÉTODOS.....	33

3.1 LEVANTAMENTO DAS CARACTERÍSTICAS GEOMÉTRICAS E DIMENSIONAIS.....	33
3.2 PROPRIEDADES MECÂNICAS DOS MATERIAIS DA ESTRUTURA DO MASTRO DA SONDA	35
3.3 MODELOS EM SOFTWARE CAD	36
3.4 CONDIÇÕES DE CONTORNO E CARREGAMENTOS	40
3.4.1 Resumo das condições de contorno e carregamentos.....	41
3.4.2 Condições de contorno e carregamentos	43
3.5 MODELO DE ELEMENTOS FINITOS	50
3.5.1 Contatos	50
3.5.2 Malha de elementos finitos.....	51
3.6 CRITÉRIOS DE ANÁLISE	55
4 RESULTADOS E DISCUSSÃO	56
4.1 RESULTADOS PARA CONDIÇÃO DE OPERAÇÃO - HIPÓTESE A.....	56
4.2 RESULTADOS PARA CONDIÇÃO DE OPERAÇÃO - HIPÓTESE B	61
4.3 RESULTADOS PARA CONDIÇÃO DE OPERAÇÃO - HIPÓTESE C.....	66
4.4 RESULTADOS PARA CONDIÇÃO DE OPERAÇÃO - HIPÓTESE D.....	71
4.5 RESULTADOS PARA CONDIÇÃO ESPERADA DE VENTO – HIPÓTESE E.....	76
4.6 RESULTADOS PARA CONDIÇÃO ESPERADA DE VENTO - HIPÓTESE F.....	81
4.7 RESUMO DOS RESULTADOS	86
4.7.1 Análise Comparativa para a condição de operação – Hipóteses A, B, C e D.	86
4.7.2 Valores limites de carregamentos combinados	88
5 CONCLUSÕES.....	93
6 RECOMENDAÇÕES DE TRABALHOS FUTUROS.....	94
REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	95
APÊNDICE A – METODOLOGIA PARA A DETERMINAÇÃO DA DIREÇÃO DA CARGA DEVIDA AÇÃO DO VENTO MAIS CRÍTICA ATUANDO SOBRE A ESTRUTURA	98
A.1 CONDIÇÕES GERAIS	99
A.2 DETERMINAÇÃO DA FORÇA DEVIDA A AÇÃO DO VENTO.....	100

APÊNDICE B – DETERMINAÇÃO DA TENSÃO ADMISSÍVEL DE FLAMBAGEM	105
.....	
B.1 AISC 360-10 – CAPÍTULO B SEÇÃO B4 – MEMBER PROPERTIES	106
B.2 AISC 360-10 – CAPÍTULO E – DESIGN OF MEMBERS FOR COMPRESSION .	108
B.2.1 AISC 360-10 – Capítulo E Seção E3 – Flambagem por Flexão de Membros sem Elementos Esbeltos “ <i>Flexural Buckling of Members without Slender Elements</i> ”	108
B.3 ANÁLISE DOS RESULTADOS	109
APÊNDICE C – ANÁLISE DE CONVERGÊNCIA DE MALHA.....	110
APÊNDICE D – PROCEDIMENTO PARA LEVANTAMENTO DAS INFORMAÇÕES DO MASTRO DE SONDA DE PRODUÇÃO TERRESTRE DE POÇOS DE PETRÓLEO.....	115
APÊNDICE E – ATIVIDADES REALIZADAS DURANTE O DESENVOLVIMENTO DO ESTUDO.....	119
APÊNDICE F – DESLOCAMENTO DO MASTRO.....	121
ANEXO A – ISOPLETAS DE VELOCIDADE BÁSICA DO VENTO	129
ANEXO B – TESTE DE CARGA DA SONDA DE PRODUÇÃO/PERFURAÇÃO DE POÇOS DE PETRÓLEO.....	131
ANEXO C – IMAGENS DE ACIDENTES COM MASTROS FONTE: LADS CAPÍTULO COLÔMBIA.....	134

LISTA DE FIGURAS

	Página
Figura 2.1 – Torre de perfuração	21
Figura 2.2 – Mastro de sonda de produção terrestre.....	22
Figura 2.3 – Estaleiramento de tubos paralelo ao solo [Fonte: Thomas (2001)].....	23
Figura 2.4 – Aproximação do contínuo através de uma linha.	29
Figura 2.5 – Elemento de viga e suas características [Fonte: Filho (2006)]	29
Figura 2.6 – Aproximação do contínuo 3D por uma superfície.	30
Figura 2.7 – Aplicação prática de modelo com elementos de casca [Fonte: Filho (2006)]	31
Figura 2.9 – Elemento sólido hexaédrico e suas características [Fonte: Filho (2006)].....	32
Figura 3.1 – Exemplo dos pontos de medição de espessura de parede	33
Figura 3.2 – Mastro superior da sonda de produção terrestre	34
Figura 3.3 – Identificação Mastro superior da sonda de produção terrestre.....	34
Figura 3.4 – Exemplo dos pontos de medição de dureza	35
Figura 3.5 – Estrutura completa da sonda sem tubos estaleirados	37
Figura 3.6 – Estrutura completa da sonda com tubos estaleirados.....	37
Figura 3.8 – Espias modeladas com elementos de viga	39
Figura 3.9 – Componentes modelados com elementos de casca.....	40
Figura 3.10 – Restrição da estrutura.....	43
Figura 3.11 – Restrição da parte inferior do mastro	43
Figura 3.12 – Aplicação da aceleração da gravidade	44
Figura 3.13 – Aplicação do carregamento de içamento	45
Figura 3.14 – Sistema simplificado do sistema de elevação de carga [Adaptado Lyons (1996)]	46
Figura 3.15 – Carregamento devido ação do vento somente no mastro.....	47
Figura 3.16 – Carregamento devido a ação do vento aplicado sob a estrutura e os tubos estaleirados	48
Figura 3.17 – Configuração de pré-carga nas espias de vento	49
Figura 3.18 – Exemplo de regiões onde foram utilizados restrições do tipo joint	50
Figura 3.19 – Malha gerada na estrutura	51
Figura 3.20 – Detalhe da malha na região do bloco de coroamento	52
Figura 3.21 – Detalhe da malha na região próximo a mesa do torrasta	53

Figura 3.22 – Detalhe da malha na parte inferior da estrutura.	54
Figura 4.1 – Deslocamento total da estrutura (escala de deformação: 50x).....	57
Figura 4.2 - Gradiente de tensões na estrutura do mastro	58
Figura 4.3 – Regiões acima do limite admissível.....	59
Figura 4.4 – Variação do Deslocamento x Carregamento de Içamento Estático para Hipótese A	60
Figura 4.5 – Variação do Coeficiente de Segurança x Carregamento de Içamento Estático para Hipótese A.....	60
Figura 4.6 – Deslocamento total da estrutura (escala de deformação: 50x).....	62
Figura 4.7 – Gradiente de tensões na estrutura do mastro.....	63
Figura 4.8 – Regiões acima do limite admissível.....	64
Figura 4.9 – Variação da Deformação x Carregamento de Içamento Estático para Hipótese B	65
Figura 4.11 – Deslocamento total da estrutura (escala de deformação: 50x).....	67
Figura 4.12 – Gradiente de tensões na estrutura do mastro.....	68
Figura 4.13 – Regiões acima do limite admissível.....	69
Figura 4.15 – Variação do Coeficiente de Segurança x Carregamento de Içamento Estático para Hipótese C	70
Figura 4.16 – Deformação total da estrutura (escala de deformação: 50x).....	72
Figura 4.17 – Deformação total da estrutura (escala de deformação: 50x).....	73
Figura 4.18 – Regiões acima do limite admissível.....	74
Figura 4.19 – Variação da Deformação x Carregamento de Içamento Estático para Hipótese D	75
Figura 4.20 – Variação do Coeficiente de Segurança x Carregamento de Içamento Estático para Hipótese D	75
Figura 4.21 – Deformação total da estrutura (escala de deformação: 50x).....	77
Figura 4.22 – Gradiente de tensões na estrutura do mastro.....	78
Figura 4.23 – Regiões acima do limite admissível.....	79
Figura 4.24 – Variação da Deformação x Carregamento de Içamento Estático para Hipótese E	80
Figura 4.25 – Variação do Coeficiente de Segurança x Carregamento de Içamento Estático para Hipótese E.....	80
Figura 4.26 – Deslocamento total da estrutura (escala de deformação: 20x).....	82

Figura 4.27 – Gradiente de tensões na estrutura do mastro.....	83
Figura 4.28 – Regiões acima do limite admissível.....	84
Figura 4.30 – Variação do Coeficiente de Segurança x Carregamento Içamento Estático para Hipótese F.....	85
Figura 4.31 – Variação da deformação máxima entre as hipóteses A, B, C e D.....	86
Figura 4.32 – Variação do coeficiente de segurança entre as hipóteses A, B, C e D.....	87
Figura 4.33 - Valores limites de carregamentos combinados na condição de operação com tubos estaleirados.....	88
Figura 4.34 – Valores limites de carregamentos combinados na condição de operação sem tubos estaleirados.....	89
Figura 4.35 – Análise comparativa dos valores limites de carregamentos combinados entre condição de operação com tubos estaleirados e sem tubos estaleirados	90
Figura A.1 – Direções de vento analisadas	99
Figura A.2 – Diagrama de área projetada.....	100
Figura A.3 – Ângulo de inclinação (ϕ) entre a direção do vento e o eixo longitudinal da estrutura	101
Figura A.4 – Variação da força x Direção do Vento 12,86 m/s (25 Knots).....	103
Figura A.5 – Variação da força x Direção do Vento 30,87 m/s (60 Knots).....	104
Figura B.1 – Identificação dos elementos	107
Figura C.1 – Tensões nos tubos das colunas do mastro superior da estrutura	112
Figura C.2 – Tensões nos tubos das colunas do mastro inferior da estrutura	113
Figura F.1 – Configuração das espias do mastro.....	122
Figura F.2 – Carregamentos do 1º <i>load step</i> , gravidade + pré-carga nas espias de vento.....	123
Figura F.3 – Posição da deformada após aplicação dos carregamentos do 1º <i>load step</i>	124
Figura F.4 – Carregamentos do 2º <i>load step</i> , gravidade + pré-carga nas espias de vento + carregamento de içamento estático.....	125
Figura F.5 – Posição da deformada após aplicação dos carregamentos do 2º <i>load step</i>	126
Figura 2 – Regiões das colunas do mastro que excedem o valor da tensão de escoamento de 315 MPa para carga de içamento de 1201,01 kN (270 klbf).....	133

LISTA DE TABELAS

	Página
Tabela 2.1 – Combinações de carregamentos de projeto [Adaptado API 4F (2008)].....	24
Tabela 3.1 – Propriedades mecânicas dos materiais.....	36
Tabela 3.2 – Carregamentos de Projeto, conforme API Spec 4F – 3º edição:2008	41
Tabela 3.3 – Valores dos carregamentos de projeto da sonda de produção terrestre	42
Tabela 3.4 – Tipos de elementos utilizados nas análises.....	51
Tabela 3.5 – Limite de tensões admissíveis	55
Tabela F.1 – Deslocamentos direcionais para hipótese A	127
Tabela F.2 – Deslocamentos direcionais para hipótese B	127
Tabela F.3 – Deslocamentos direcionais para hipótese C	127
Tabela F.4 – Deslocamentos direcionais para hipótese D.....	128
Tabela F.5 – Deslocamentos direcionais para hipótese E	128
Tabela F.6 – Deslocamentos direcionais para hipótese F.....	128

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

SÍMBOLO	DESCRIÇÃO
θ	Ângulo de Direção do Vento
Ω	Fator de segurança
ϕ	ângulo de inclinação da estrutura
A	Área Projetada
ABNT	Associação Brasileira de Normas Técnicas
AISC	American Institute of Steel Construction
API	American Petroleum Institute
ASD	Allowable Strength Design
ASTM	American Society for Testing and Materials
CAD	Computer Aided Design
C_s	Fator de forma
FEA	Finite Element Analysis
F_m	Força do Vento
K_i	Fator de correção devido ao ângulo de inclinação da estrutura
N	Número de linhas da Catarina
P	Carga máxima estática da sonda
P_l	Carga máxima estática nas linhas rápida e morta
R_a	Resistência Requerida
R_n	Resistência Nominal
SAE	Society of Automotive Engineers
V_{des}	Velocidade de projeto
V_z	Velocidade do vento corrigida
β	Fator de elevação

RESUMO

O mundo do petróleo envolve investimentos de bilhões de dólares por ano, sendo que falhas e acidentes com sondas de perfuração/produção de poços de petróleo podem resultar em severas conseqüências econômicas e judiciais as empresas responsáveis pela operação destes equipamentos.

Atualmente no Brasil a maior parte das sondas de produção terrestre está em operação há mais de três décadas e não há um levantamento ou acompanhamento estatístico dos acidentes operacionais ocorridos durante a atividade de intervenção em poços de petróleo ou gás com sondas de produção terrestres. Entretanto, acidentes com estes equipamentos são freqüentes em campos brasileiros, porém devido à falta de uma fiscalização rígida, muitos destes acidentes são negligenciados.

Este estudo visa à elaboração de um modelo pelo método de elementos finitos para avaliação dos limites operacionais de estruturas de mastros de sondas de produção terrestres.

O trabalho foi elaborado a partir dos requisitos e recomendações técnicas da Norma API Spec 4F - 3ª edição: 2008.

O estudo apresentou o comportamento estrutural do mastro da sonda de produção terrestre após alguns anos em operação, a partir de um estudo de engenharia reversa em campo. Foi realizado um levantamento das características geométricas, dimensionais e tipos de materiais utilizados na fabricação da estrutura.

Após o levantamento em campo, foram analisados todos os requisitos e requerimentos técnicos da norma API 4F aplicáveis à realidade da operação destes equipamentos em campos brasileiros.

Através do modelo de elementos finitos foram apresentados em forma de gráficos os limites operacionais de carregamentos simples e combinados que a estrutura da sonda pode ser submetida. Também é apresentado um estudo comparativo entre a carga de içamento estático especificada originalmente pelo fabricante e o valor atual que a estrutura pode ser submetida, bem como as regiões mais críticas do mastro.

PALAVRAS CHAVES: Elementos Finitos, Intervenção, Mastro, Manutenção, Perfuração.

ABSTRACT

The world oil involves investments of billions dollars per year, however, failures and accidents with drilling rigs / well servicing rigs mast of oil Wells can result in severe consequences economics and legals to companies responsables by operation this equipments.

Currently in Brazil most onshore rigs are in operation more than three decades and there isn't survey or statistics monitoring of the operational accidents occurred during well servicing activity in well oil or gas with onshore rigs masts. However accidents with this equipments are frequents in Brazilian fields, but due absence of a rigid inspection, many of these accidents are ignored.

This study aimed at developing a model by the Finite Element Method to evaluate the structural operational limits of onshore well servicing rigs masts.

The dissertation was drafted from the technical requirements and recommendations of API Spec 4F - 3rd 2008 Edition Standard.

The study showed the structural behavior of onshore well servicing probe mast structure after a few years in operation, from a reverse engineering study in the field. A survey of geometric features, dimensions and types of materials used in the structure manufacturing was conducted.

After the field survey, all the API 4F Standard technical requirements, applicable to this equipment operational reality in Brazilian fields were analyzed.

By the Finite Element Model, the operational limits of single and combined loads that the probe structure can be subjected were presented in graph form. A comparative study between static hoisting load originally specified by the manufacturer and the current value that the structure can be submitted was also presented, as well as the most critical regions of the mast.

KEYWORDS: Drilling, Finites Elements, Mast, Well Servicing, Workover.

1 INTRODUÇÃO

Na indústria de petróleo & gás são empregados os mais diversos tipos de equipamentos e técnicas operacionais dimensionadas especificadamente para cada tipo de operação de um determinado campo de produção.

Entre as atividades tratadas pela indústria petrolífera estão as intervenções em poços de petróleo, denominadas *workover*, que são solicitadas periodicamente e realizadas por unidades móveis denominadas sondas de produção terrestre (SPT) com o intuito de manter ou aumentar a produtividade de um determinado poço de produção de petróleo ou gás.

As sondas de produção terrestre são utilizadas durante uma operação de manutenção ou intervenção em poços de petróleo ou gás. Estas operações também são conhecidas como atividade de *Workover* e *Well Servicing*.

As atividades de perfuração e intervenção de poços de petróleo implicam em situações de elevado risco a vida humanas, perdas de ativos materiais e riscos de catástrofes ambientais. Erros operacionais e falhas de equipamentos são as maiores causas destes acidentes.

As sondas são ativos com elevado custo de operação, sendo que falhas, atrasos na realização dos serviços de intervenção e, principalmente, acidentes causam grandes danos à imagem das empresas além de prejuízos financeiros.

Como aos investidores e administradores interessa o retorno financeiro, muitas vezes as medidas preventivas de manutenção são vistas como custos e afetam o retorno de seus investimentos (Penteado, 2012).

Acidentes causam sérios danos à imagem das empresas e geralmente, quando um grande acidente ocorre, gera-se a dúvida se suas causas se originam apenas nas operações das empresas ou se indicam problemas sistemáticos de todo um setor industrial (Skogdalen *et al.*, 2011, apud Almeida *et. al.*, 2012). Neste sentido é de fundamental importância que os riscos relacionados às operações sejam conhecidos e monitorados em diferentes níveis. Assim análises de agentes regulatórios e/ou corporativos são importantes para que ocorra o acompanhamento e adoção das medidas preventivas e corretivas cabíveis (Artigo Almeida *et. al.*, 2012).

Em julho de 2007, parte de um mastro de equipamento de perfuração foi derrubado, deixando vários trabalhadores gravemente feridos. O acidente ocorreu no campo de Big Dog em Stanton, Texas. Após uma inspeção pela *Occupational Safety and Health Administration*

(OSHA), o secretário emitiu uma citação alegando sérias violações contra a segurança ocupacional, propondo uma dura pena financeira a operadora (OSHA, 2007).

Segundo relatos da *Latin America Drilling Safety (LADS)*, na Colômbia são registrados de três a cinco acidentes por ano, sendo que muitas têm sua origem devido a falhas humanas e estruturais.

Na indústria de petróleo da Argentina os equipamentos estão em operação há aproximadamente 35 anos, sendo que muitas possuem estruturas muito antigas e manutenções deficientes. A grande maioria encontra-se sem sua placa de identificação e as estruturas são adaptadas sem um aval técnico.

No ano de 1999 a LADS começou um processo para elaboração de procedimentos específicos de inspeção de mastro/torre de sondas. Inicialmente o procedimento somente contemplava inspeção de junções soldadas e aspectos gerais. A partir de 2004 alguns operadores propuseram converter este simples procedimento em norma, porém incorporando conceitos de verificação técnica e visual.

Em março de 2007 foi publicada pela LADS Argentina a recomendação prática para verificação técnica e inspeção de mastros petroleiros. Um dos itens incorporados é o estudo de verificação técnica analítica (VTA). Este estudo consiste na verificação da capacidade de carga estática no ganho do mastro e seus componentes conforme definido pela API Spec 4F, através do método de elementos finitos. A finalidade deste estudo é estimar um coeficiente de segurança de acordo com a condição real e a identificação dos pontos críticos do mastro da sonda. O coeficiente de segurança mínimo estabelecido pela LADS é igual a 1,30.

A API Spec 4F - 3ª edição: 2008 é a norma internacionalmente reconhecida e utilizada para especificações de Estruturas de Perfuração e Serviços em Poço e estabelece no seu escopo requisitos e recomendações para projetos de estruturas de sondas.

A API no item 11.7.2 menciona que a faixa de acuracidade de projeto de cada estrutura deve ser testada por carga de prova ou por um modelo computacional, tal como análise por elementos finitos (FEA). O teste deve avaliar a estrutura para cada combinação de carga, especificada no item 7.

No Brasil atualmente não se identifica um levantamento ou acompanhamento estatístico dos acidentes operacionais ocorridos durante a operação de *workover* com sondas de produção terrestres. Entretanto, através de relatos informais obtidos com profissionais da área, acidentes com estes equipamentos são frequentes em campos brasileiros, porém devido à falta de uma fiscalização rígida, muitos destes acidentes são negligenciados.

O Brasil não é membro da LADS, entretanto, no final da primeira década do século XXI uma empresa de capital Argentino adquiriu o controle de duas empresas Brasileiras especializadas em serviços de *workover* com operações na região nordeste. A partir deste momento começou a implantar o estudo de verificação técnica analítica em algumas sondas de produção terrestres, conforme requisitos estabelecidos pela LADS. Porém, mesmo assim acidentes continuam ocorrendo.

O mundo do petróleo envolve investimentos de bilhões de dólares por ano (No Brasil e no Mundo), sendo que falhas e acidentes com sondas podem resultar em perdas de produção, catástrofes ambientais e, principalmente, em perdas de vidas humanas, resultando com isso em severas consequências econômicas e judiciais as empresas responsáveis pela operação destes equipamentos.

Atualmente no Brasil a maior parte das sondas de produção terrestre está em operação há mais de três décadas. Muitas destas sondas já passaram por várias manutenções e, inclusive, com mudanças das características estruturais originais de projeto, sendo que muitas também não possuem a documentação técnica necessária.

As empresas operadoras destes equipamentos raramente avaliam suas sondas através de carga de prova ou por análise de elementos finitos, sendo que quando fazem também não utilizam um procedimento específico de acordo com alguma norma reconhecida internacionalmente, como por exemplo, a API 4F.

Com base no exposto acima, justifica-se à elaboração de um estudo para avaliação dos limites operacionais da estrutura de mastro de sonda de produção terrestre agregando, desta forma, conhecimento sobre o estado real da integridade estrutural do mastro, identificação das regiões de mais tensionadas, possibilitando maior confiabilidade para especificar o valor de carregamento de içamento para uma determinada condição de operação.

1.1 OBJETIVOS

O presente estudo tem como objetivo a elaboração de um modelo para avaliação dos limites operacionais da estrutura do mastro da sonda de produção terrestre através do método de elementos finitos, conforme requisitos estabelecidos pela norma API Spec 4F - 3ª edição: 2008.

1.2 OBJETIVOS ESPECÍFICOS

Os objetivos específicos que serão estudados neste trabalho são:

- Análise comparativa entre a carga estática especificada pelo fabricante e o valor de carga estática atual do mastro da sonda;
- Identificação das regiões críticas do mastro da sonda de produção terrestre.
- Avaliar os valores limites de carregamentos combinados.

2 REVISÃO DA LITERATURA

2.1 OPERAÇÃO DE WORKOVER

Workover é a variedade de operações realizadas no poço para manter, restaurar ou melhorar a produtividade do poço, podendo incluir serviços tais como: Substituição de tubos danificados, recompletação, acidificação, fechamento e abandono da zona de produção.

Já o termo *Well Servicing* refere-se à operação de *Workover* realizada através da árvore de natal “*Christmas Tree*” com a produção da tubulação no local. Esta operação também é conhecida como *Well Intervention*, *Coiled Tubing*, *Wireline* e *Snubbing* são alguns dos serviços relacionados aos termos descritos. Muitas das operações são similares, mas são restringidas pelo diâmetro interno da tubulação [Schlumberger (2013)].

2.2 SONDA DE PRODUÇÃO TERRESTRE

O mastro da sonda de produção terrestre móvel é uma estrutura que proporciona o apoio necessário para elevar e baixar tubos de perfuração e de revestimento, ferramentas e outros acessórios durante a perfuração e as operações de manutenção em poços de petróleo. A estrutura do mastro é projetada para suportar com segurança todas as cargas que são submetidas durante a vida útil da mesma, como cargas de içamento, peso próprio, cargas devido à ação do vento e cargas provenientes de terremotos.

2.2.1 Sistema de Sustentação de Cargas

O sistema de sustentação de cargas é constituído do mastro ou torre, da subestrutura e da base ou fundação. A carga corresponde ao peso da coluna de perfuração ou revestimento que está no poço e é transmitida para o mastro ou torre que, por sua vez, a descarga para a subestrutura e esta para a fundação ou base.

2.2.2 Torre ou mastro

A operação de retirada da coluna do poço é chamada de manobra. Por economia, muitas vezes a manobra é feita retirando-se seções de dois ou três tubos (Cada tubo mede

aproximadamente 9 metros), exigindo, desta forma, uma torre ou mastro em alguns casos com mais de 45m de altura.

A torre ou mastro é uma estrutura de aço estrutural, de forma piramidal de modo a prover um espaçamento vertical livre acima da plataforma de trabalho para permitir a execução de manobras.

Uma torre é constituída de um grande número de peças que são montadas uma a uma, conforme ilustrado na Figura 2.1. O mastro ilustrado na Figura 2.2, é uma estrutura treliçada de perfil quadrado ou tubular que, após ser baixada pelo guincho da sonda, é subdividida em três ou quatro seções, os quais são transportados para a locação de um novo poço, onde são montadas na posição horizontal e elevadas para a vertical.

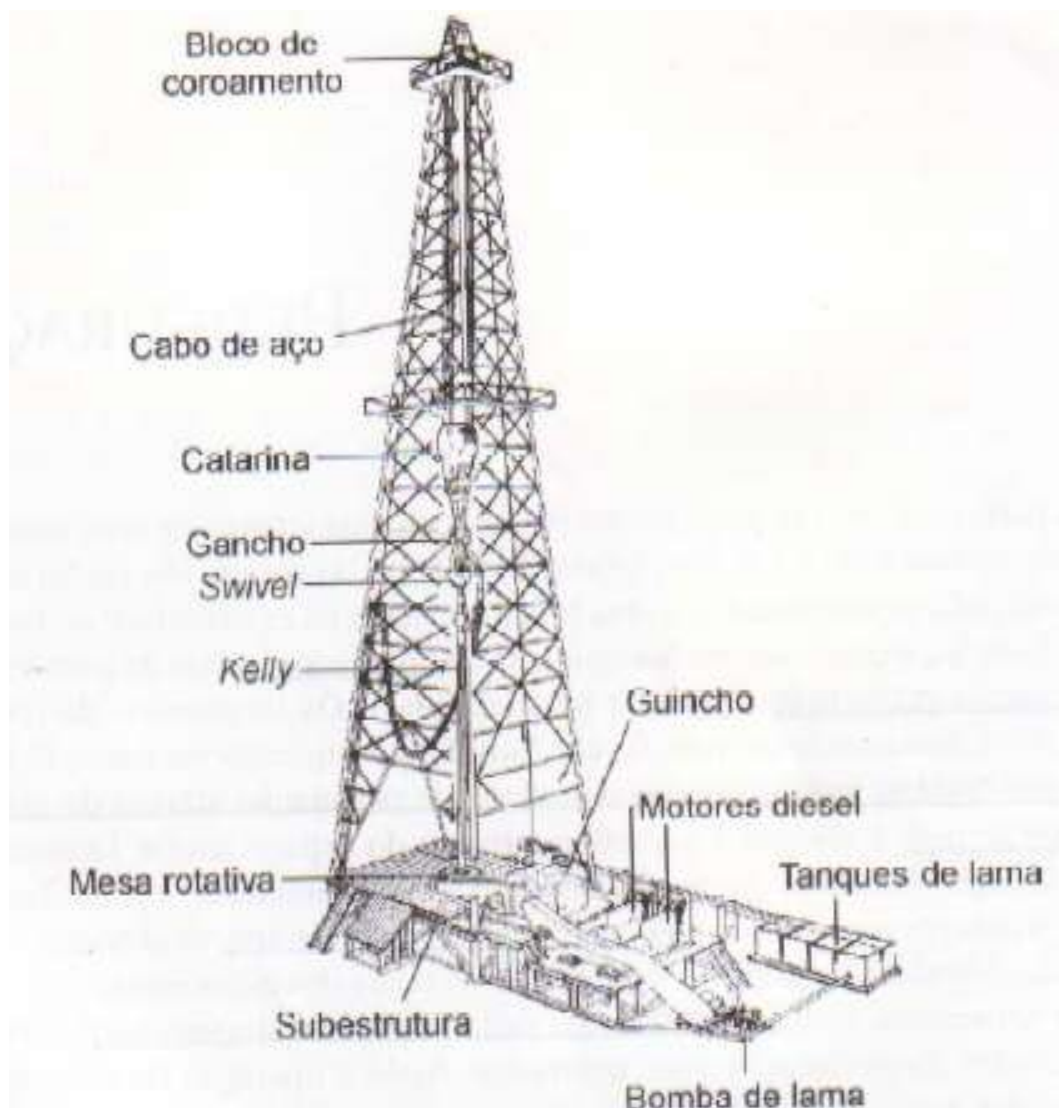


Figura 2.1 – Torre de perfuração



Figura 2.2 – Mastro de sonda de produção terrestre

2.2.3 Subestruturas

A subestrutura é constituída de vigas de aço montadas sobre a fundação ou base da sonda, de modo a criar um espaço de trabalho sob a plataforma, onde são instalados os equipamentos de segurança do poço.

As fundações ou bases são estruturas rígidas construídas em concreto, aço ou madeira que, apoiadas sobre o solo resistente, suportam com segurança as deflexões, vibrações e deslocamentos provocados pela sonda.

2.2.4 Estaleiro

O estaleiro é uma estrutura metálica constituída de diversas vigas apoiadas acima do solo por pilaretes, conforme ilustrado na Figura 2.3. O estaleiro fica posicionado na frente da sonda e permite manter todas as tubulações dispostas paralelamente a uma passarela para

facilitar o seu manuseio. Já a Figura 2.3, ilustra o estaleiramento de tubos sobre a mesa do torrasta.



Figura 2.3 – Estaleiramento de tubos paralelo ao solo [Fonte: Thomas (2001)].

2.2.5 Sistema de Movimentação de Cargas

O sistema de movimentação de cargas permite movimentar as colunas de perfuração, revestimento e outros equipamentos.

Os principais componentes do sistema são: guincho, bloco de coroamento, Catarina, cabo de perfuração, gancho e elevador.

- a. **Guincho:** Recebe a energia mecânica necessária para movimentação de cargas através da transmissão principal, no caso de sondas diesel, ou diretamente de um motor elétrico acoplado a ele, nas sondas elétricas.
- b. **Bloco de Coroamento:** É um conjunto estacionário de 4 a 7 polias montadas em linha num eixo suportado por dois mancais de deslizamento, localizado na parte superior do mastro ou torre. O bloco suporta todas as cargas que lhe são transmitidas pelo cabo de perfuração.
- c. **Catarina:** É um conjunto de 3 a 6 polias móveis montadas em um eixo que se apóia nas paredes externas da própria estrutura da Catarina. A Catarina fica suspensa pelo cabo de perfuração que passa alternadamente pelas polias do bloco de coroamento e polias da Catarina, formando um sistema com 8 a 12 linhas passadas. Na parte inferior da Catarina encontra-se uma alça pela qual é preso o gancho. O gancho consiste de um corpo cilíndrico que internamente contém um sistema de amortecimento para evitar que os golpes causados na movimentação das cargas se propagem para a Catarina.

2.3 A NORMA API SPEC 4F – 3ª EDIÇÃO: 2008

A API Spec 4F - 3ª edição: 2008 estabelece no seu escopo recomendações e requisitos apropriados para estruturas referentes às operações de perfuração “*Drilling*” e manutenção “*Well-Servicing*” da indústria de petróleo. Esta especificação é aplicável para novos projetos de Grua ou Torre de Perfuração de Aço “*Steel Derrick*”, *Mastro “Masts”, Mastro Acorrentado “Guyed Masts”, Subestruturas “Substructures” e Bloco de Coroamento “Crown Blocks”*”.

2.3.1 Cargas de Projeto

No item 8.1.1 a norma API 4F estabelece que a estrutura deve ser projetada e avaliada, conforme combinações de carregamentos ilustradas na Tabela 2.1.

Tabela 2.1 – Combinações de carregamentos de projeto [Adaptado API 4F (2008)]

Hipótese	Condição do carregamento de Projeto	Peso Próprio ¹ (%)	Carga Gancho ² (%)	Carga Rotativa (%)	Carga Tubos Estaleirados (%)	Cargas Ambientais
1a	Operação	100	100	0	100	100% Ambiente Operacional
1b	Operação	100	TE	100	100	100% Ambiente Operacional
2	Esperado	100	TE	100	0	100% Esperada Tempestade
3a	Inesperado	100	TE	100	100	100% Inesperada Tempestade
3b	Inesperado	100	Conforme Aplicável	Conforme Aplicável	Conforme Aplicável	100% Terremoto
4	Montagem	100	Conforme Aplicável	0	0	100% Ambiente Operacional
5	Transporte	100	Conforme Aplicável	0	Conforme Aplicável	100% Ambiente Transporte

¹ Para cálculo de estabilidade, baixos valores de carga própria deve ser considerada, conforme item 8.8 da norma API 4F.

² Para condições vento não operacionais, o peso de todos os equipamentos de elevação e linhas de perfuração suspensão a partir do bloco de coroamento (TE) deve ser considerado em todas hipóteses, conforme aplicável.

2.3.2 Especificações de Projeto

No item 8.1.1, a norma API 4F estabelece que a estrutura de aço deve ser projetada e avaliada, conforme requisitos estabelecidos pela norma AISC 335-89. O capítulo da norma AISC 335-89, referente ao método Projeto de Tensões Admissível (*Allowable Stress Design - ASD*), usualmente chamada de Projeto Elástico, deve ser utilizada para determinar as tensões admissíveis. O uso do método de Projeto Plástico não é permitido para análise deste tipo de estrutura.

2.3.3 Carregamentos de Operação

Os carregamentos de operações devem consistir no mínimo por carregamentos simples ou combinados, conforme descrito abaixo.

- a. Máxima carga estática no gancho, combinados com carregamentos na linha morta “*Deadline*” e linha do guincho principal “*Fastline*”, para cada condição de içamento.
- b. Máxima carga estática de rotação;
- c. Máxima carga estática de estaleiramento de tubos “*Setback*”;
- d. Peso próprio da estrutura montada;
- e. Peso dos fluidos em toda a tubulação e tanques incorporados na estrutura. A consideração deve ser dada para ambas as condições, ou seja, condição totalmente cheia e condição totalmente vazia.

2.3.4 Carregamento devido Ação do Vento

Cada estrutura deve ser projetada para os seguintes valores aplicáveis de carregamento devido ação do vento. A subestrutura deve ser projetada para o mesmo valor de velocidade de vento suportado pela estrutura.

As Estruturas são classificadas pelo seu Nível de Segurança Estrutural “*Safety Structural Level – SSL*” de acordo com sua localização de operação *Onshore* ou *Offshore*.

O nível de segurança estrutural (SSL) reflete vários graus de consequência de falhas, considerando segurança a vida, poluição, perdas econômicas e interesse público.

A configuração da estrutura de perfuração durante um dado ambiente de carregamento de vento deve ser considerada.

As seguintes condições de ambiente de vento são definidas.

- a. **Vento Operacional:** O vento na qual as operações de *workover*/ perfuração podem ser executadas;
- b. **Vento de Montagem:** O vento na qual as operações normais de montagem podem ser executadas;
- c. **Vento de Transporte:** O vento na qual as operações de transporte como especificados pelo comprador podem ser executadas;
- d. **Vento Inesperado:** Vento a partir de um súbito furacão, na qual não há tempo suficiente para abaixamento dos tubos.
- e. **Vento Esperado:** Vento a partir de um conhecido furacão ou tempestade, na qual o tempo para toda preparação é suficiente, como por exemplo, o abaixamento dos tubos estaleirados.

A norma API Spec 4F menciona que a direção crítica de vento sobre a estrutura é a área da diagonal, ou seja, região de maior área projetada. Esta regra é reconhecida por outros códigos de especificação de cargas de vento como ASCE/SEI 7-05 e *Australian Specification AS 1170.2*. O APÊNDICE A, ilustra a carga atuante sobre a estrutura para diferentes direções de vento agindo sobre a estrutura.

2.4 AISC 360-10 – CAPÍTULO B ITEM 4 – DESIGN FOR STRENGTH USING ALLOWABLE STRENGTH DESIGN (ASD)

O método ASD (*Allowable Strength Design*) é baseado no conceito que a máxima tensão em um componente não poderá exceder uma tensão admissível especificada sob condições normais de operação. Os efeitos dos carregamentos são determinados com base em uma análise elástica da estrutura, enquanto a tensão admissível é o limitante de tensão dividido por um coeficiente de segurança. A magnitude do fator de segurança e a tensão admissível resultante dependem de um estado limite governante particular, contra o qual o projeto deverá produzir certa margem de segurança.

Para qualquer elemento simples poderá haver um número de diferentes tensões admissíveis que deverão ser verificadas.

O projeto de acordo com o método ASD satisfaz os requisitos quando a resistência admissível de cada componente estrutural iguala ou excede a resistência requerida determinada com base nas cargas combinadas para ASD.

O projeto deverá ser executado de acordo com a equação abaixo (equação B3-2 da AISC 360-10).

$$R_a \leq R_n / \Omega$$

Onde:

R_a: Resistência requerida usando as combinações de carga para ASD;

R_n: Resistência nominal, especificada nos Capítulos de B a K da Norma AISC 360-10;

Ω: Fator de segurança, especificado nos Capítulos de B a K da Norma AISC 360-10;

R_n/Ω: Resistência admissível.

Desta maneira, podemos entender que a máxima tensão à que um componente poderá ser submetido será igual à tensão nominal (tensão de escoamento ou ruptura) dividida por um fator de segurança. Para cada tipo de solicitação (tração e compressão, por exemplo) tem-se um fator de segurança a ser aplicado. Este fator pode ser diferente para cada tipo de aplicação.

No presente trabalho foram utilizados os seguintes capítulos da norma AISC 360-10.

- **Capítulo D:** Apresenta os critérios para a determinação dos limites de resistência a tração para tensão de escoamento e de ruptura, onde os coeficientes de segurança (Ω) são 1,67 e 2, respectivamente;
- **Capítulo E:** Apresenta os critérios para a determinação dos limites de resistência a compressão para tensão de escoamento, onde o coeficiente de segurança (Ω) é 1,67;
- **Capítulo F:** Apresenta os critérios para a determinação dos limites de resistência a flexão para tensão de escoamento, onde o coeficiente de segurança (Ω) é 1,67;
- **Capítulo G:** Apresenta os critérios para a determinação dos limites de resistência ao cisalhamento, onde o coeficiente de segurança (Ω) é 1,67;
- **Capítulo H:** Apresenta os critérios para a determinação dos limites de resistência aos esforços combinados (tração/compressão/flexão com ou sem torção ou somente torção), onde o coeficiente de segurança (Ω) é 1,67;

Em situações envolvendo tensões combinadas é necessário definir uma tensão equivalente que possa ser utilizada para representar este estado de tensões. A utilização da teoria da energia de distorção, teoria de von Mises, é um bom meio para fazê-lo para materiais dúcteis.

Quando a energia de distorção no ponto crítico do componente atingir o mesmo valor da energia de distorção do corpo de prova no momento do seu escoamento, iniciará também o escoamento do componente naquele ponto (Shigley, 2011). Matematicamente a tensão equivalente de von Misses pode ser representada, conforme equação abaixo.

$$\sigma' = \sqrt{\frac{(\sigma_x - \sigma_y)^2 + (\sigma_y - \sigma_z)^2 + (\sigma_z - \sigma_x)^2 + 6(\tau_{xy}^2 + \tau_{yz}^2 + \tau_{zx}^2)}{2}}$$

2.5 ELEMENTOS FINITOS

Segundo Filho (2006), no dia-a-dia das atividades de engenharia, os engenheiros e projetistas são colocados diante de problemas técnicos, alguns mais simples e outros mais complexos, tendo que resolvê-los de forma satisfatória.

No desenvolvimento de cálculo de estrutural, o sucesso não está apenas condicionado ao conhecimento de um aparato matemático muitas vezes complicado, mas à capacidade que o engenheiro apresenta de entender a natureza física que se propõe a resolver (Filho, 2006).

Segundo Cook et. al. (2002), elementos finitos é um método para solução numérica de problemas de campo. O modelo matemático é discretizado pela malha de elementos finitos, assim um campo contínuo é representado por pequenos segmentos, denominado elementos, que são conectados por um por um número finito de nós.

Graus de liberdade são as variáveis fundamentais calculadas durante as análises. Para as simulações envolvendo tensão/deformação, os graus de liberdade são as translações e rotações.

Os deslocamentos, rotações e outros graus de liberdade são calculados somente nos nós do elemento. Em qualquer outro ponto do elemento, os deslocamentos são obtidos através da interpolação dos valores obtidos nos nós.

Segundo Filho (2006), um elemento de viga consiste em uma barra reta, de comprimento muito maior que as dimensões de sua seção transversal, que pode transmitir, além de esforços axiais, momentos fletores nos planos que contêm seus dois eixos principais

do plano da seção transversal da viga, forças cortantes nos mesmos planos de ação dos momentos fletores e momentos torçores em relação ao eixo dos centros de torção da viga.

São utilizados para modelar componente onde a dimensão de comprimento é significativamente maior do que as outras duas dimensões, somente a tensão na direção axial é expressiva. Aproximam o contínuo 3D com uma linha.

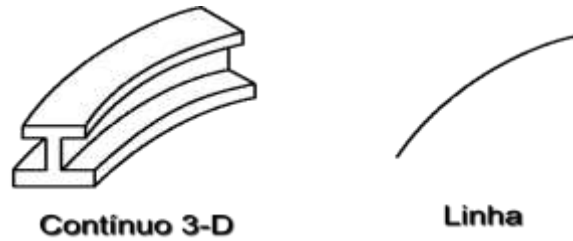


Figura 2.4 – Aproximação do contínuo através de uma linha.

Os elementos de viga 3D têm 6 graus de liberdade por nó, 3 de translação e 3 de rotação. Os elementos 2D têm 3 graus de liberdade por nó, 2 de translação e 1 de rotação em torno da normal do plano.

A Figura 2.5, ilustra as características de um elemento de viga.

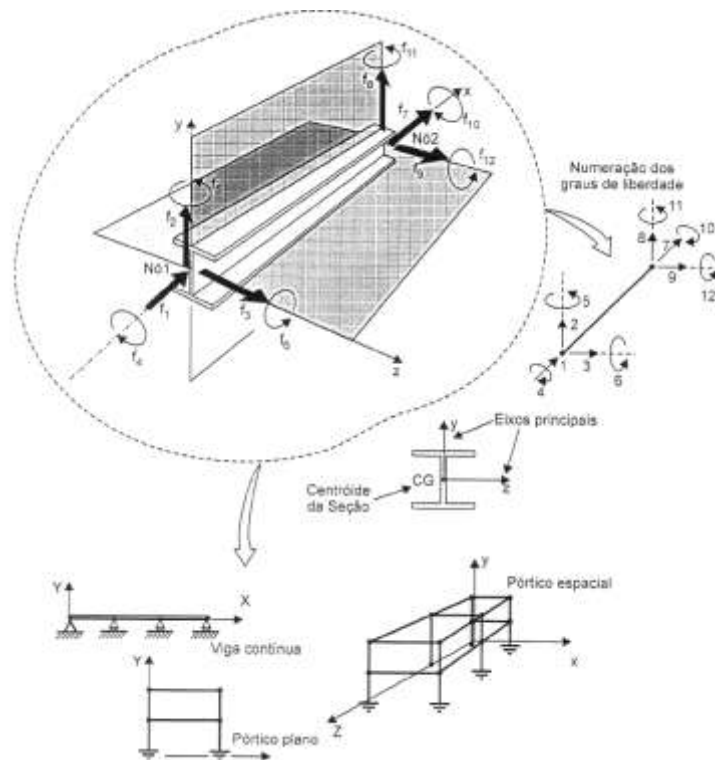


Figura 2.5 – Elemento de viga e suas características [Fonte: Filho (2006)]

As propriedades geométricas definidas para o elemento de viga são: área da seção transversal, momento de inércia, constantes torsionais. Caso a opção seja a definição da geometria apenas, o programa vai calcular o comportamento da seção por integração numérica, porém com alto custo computacional.

Os Elementos de casca são elementos utilizados onde a espessura t do corpo é muito menor em relação às outras dimensões (exemplos: chapas, tubos e perfis). São adequadas para análise detalhada de estruturas metálicas de chapa ou pequena espessura. Inúmeras aplicações utilizam modelos com esses tipos de elementos: análise de chassis e travessas, pára-choques, caixa estrutural completa de ônibus, trens e aviões.

Uma malha de casca pode sofrer esforços axiais, de flexão e torção (COOK et. al. 2002; Filho, 2006).

A casca pode ser representada por uma superfície média, onde a mesma é a distância $t/2$ em relação às superfícies internas e externas, conforme ilustrado na Figura 2.6.

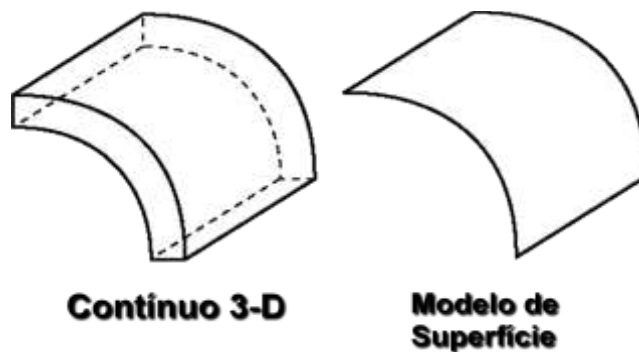


Figura 2.6 – Aproximação do contínuo 3D por uma superfície.

O modelo de casca modela deformações no plano e flexão com eficiência.

Quando a superfície média é plana, a estrutura pode ser classificada como casca plana, e casca tridimensional quando a superfície média não é plana.

A Figura 2.7, ilustra a aplicação prática de um elemento de casca.

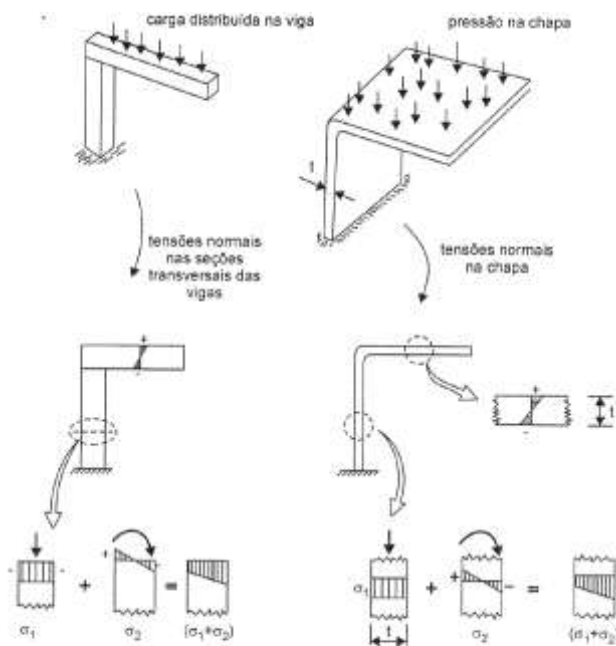


Figura 2.7 – Aplicação prática de modelo com elementos de casca [Fonte: Filho (2006)]

Os elementos de casca 3D têm 6 graus de liberdade por nó, 3 de translação e 3 de rotação. Os elementos 2D têm 5 graus de liberdade por nó, 3 de translação e 2 de rotação, não há rotação em torno da normal à casca.

A Figura 2.8, ilustra as características de um elemento de casca retangular linear.

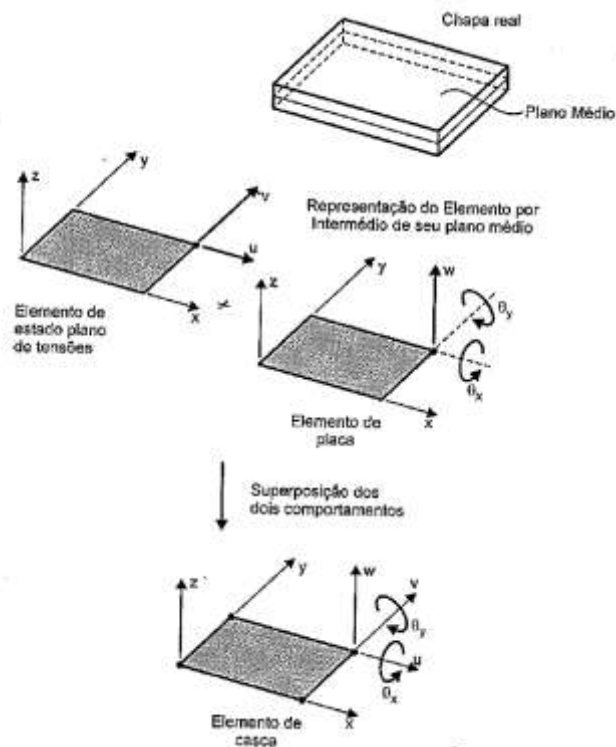


Figura 2.8 – Elemento de casca retangular linear e suas características [Fonte: Filho (2006)]

O elemento hexaédrico é particularmente adequado para estados triaxiais de tensões, ou seja, com forças agindo nas direções x , y e z . O corpo sólido pode ser subdividido artificialmente em certo número finito de elementos sólidos, conectados apenas nos seus nós. Neste caso a montagem de elementos é constituída por elementos sólidos na forma de “paralelepípedos”, que são os elementos sólidos hexaédricos (Filho, 2006).

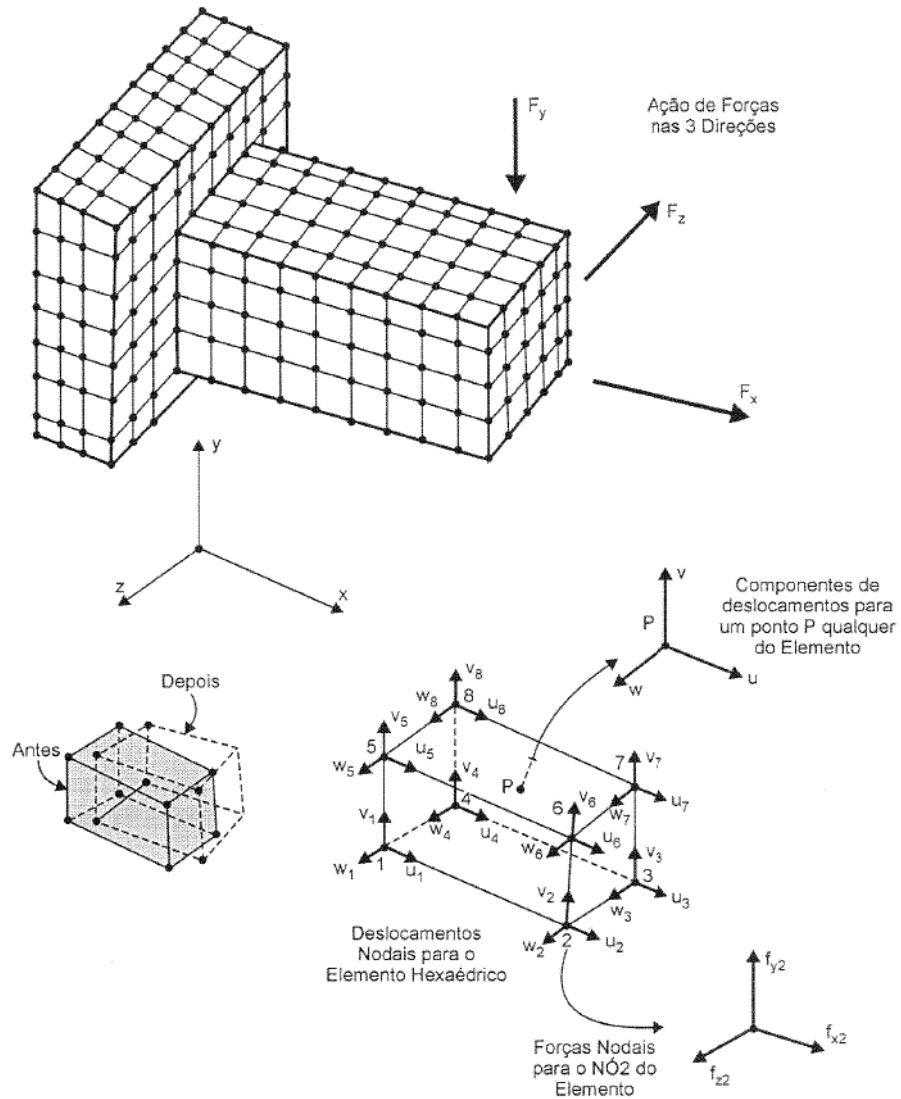


Figura 2.9 – Elemento sólido hexaédrico e suas características [Fonte: Filho (2006)]

3 MATERIAIS E MÉTODOS

A sonda de produção terrestre de poços de petróleo analisada nesta dissertação é uma FRANKS 500, fabricada no início da década de 80. Neste período várias manutenções e alterações das suas características originais foram realizadas, porém, não há nenhum registro destas ocorrências. O operador não tinha a documentação original de projeto deste equipamento.

Devido à falta a falta das informações originais de projeto e dos registros de manutenções, as características do equipamento foram obtidas em campo através de um estudo de engenharia reversa, na qual foi realizado um levantamento das características geométricas, dimensionais e tipos de materiais utilizados na fabricação da estrutura e então modeladas em software CAD para posterior análise pelo método de elementos finitos.

O APÊNDICE E, ilustra todas as atividades realizadas ao longo do estudo.

3.1 LEVANTAMENTO DAS CARACTERÍSTICAS GEOMÉTRICAS E DIMENSIONAIS

As características geométricas e dimensionais foram obtidas através de análise dimensional e medição de espessura. As dimensões foram obtidas por trena e paquímetro.

A inspeção de espessura dos tubos foram realizado em 2 regiões, equidistantes ao longo do tubo e em 4 posições perpendiculares entre si, conforme ilustrado na Figura 3.1

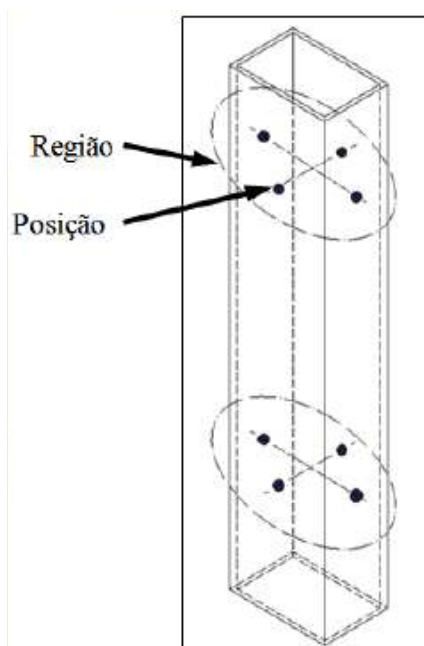


Figura 3.1 – Exemplo dos pontos de medição de espessura de parede

Para medição de espessura por ultrassom foi utilizado um equipamento Krautkramer DM4 - DL, transdutor DA 401 - 5 MHZ. A Figura 3.2, ilustra o mastro superior da sonda de produção terrestre no local de manutenção.



Figura 3.2 – Mastro superior da sonda de produção terrestre

A Figura 3.5, ilustra a identificação da capacidade de içamento estático originais do mastro da sonda.

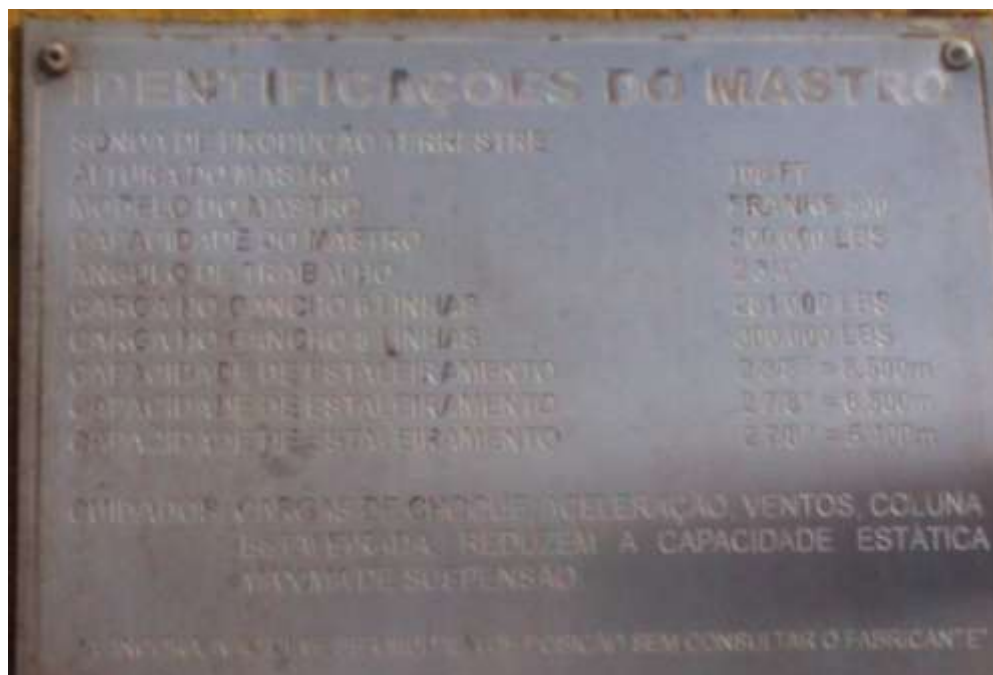


Figura 3.3 – Identificação Mastro superior da sonda de produção terrestre

3.2 PROPRIEDADES MECÂNICAS DOS MATERIAIS DA ESTRUTURA DO MASTRO DA SONDA

As propriedades mecânicas dos materiais dos elementos estruturais do mastro da sonda foram estimadas com base nos menores valores de dureza obtidos a partir de ensaios nos elementos da estrutura.

A medição de dureza foi realizada em 3 pontos ao longo do tubo, conforme ilustrado na Figura 3.4, e em 3 pontos aleatórios nas chapas e perfis, medidos em unidade Brinell (HB).

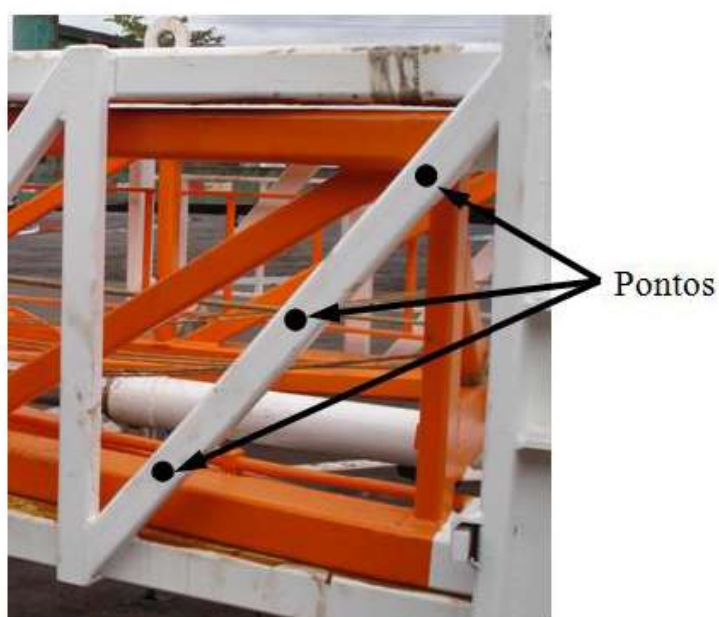


Figura 3.4 – Exemplo dos pontos de medição de dureza

A medição de dureza foi realizada com um durômetro de impacto digital modelo LD4007.

Segundo CALLISTER (2010, pág. 179), a resistência à tração e dureza são indicadores de uma resistência do material a deformação plástica. A resistência à tração pode ser aproximada com base na dureza Brinell (HB) através das equações abaixo, para resultados em MPa e psi, respectivamente.

$$TS = 3,45 \times HB \text{ (MPa)}$$

$$TS = 500 \times HB \text{ (psi)}$$

Na Tabela 3.1, são descritos os materiais dos componentes do mastro da sonda com suas propriedades mecânicas.

Tabela 3.1 – Propriedades mecânicas dos materiais

Componente Estrutural	Norma	Tensão Máx. Tração [MPa]	Tensão de Escoamento [MPa]	Fonte
Chapas	ASTM A36	400	250	Standard Specification for A36/A36M – 08, Table 2, pág. 2
Perfil I e U				
Tubos	ASTM A500 Grau C	425	315	Standard Specification for A500/A500M – 09, Table 2, pág. 2

3.3 MODELOS EM SOFTWARE CAD

A geometria consiste na estrutura do mastro da sonda de produção terrestre de perfis tubulares, modelo 96-250, altura de 32,92m (108 ft) e capacidade máxima estática de 1.334.466,48 N (300.000 lbf).

Os modelos em CAD 3D (*Computer Aided Design*) da sonda foram gerados no *software* Autodesk Inventor 2010. Posteriormente sua geometria foi importada para o *software* ANSYS Workbench 14.5.

Foram geradas duas configurações de montagem, uma com a estrutura do mastro totalmente carregada pelos tubos estaleirados e outro sem os mesmos, ambos considerando a sonda na posição de operação, ou seja, mastro totalmente estendido e com inclinação de 2,75°, mais espias de vento e mesa do operador (Torrista).

A Figura 3.5, ilustra o modelo da sonda de produção terrestre sem tubos estaleirados.

Geometry
27/02/2013 15:22

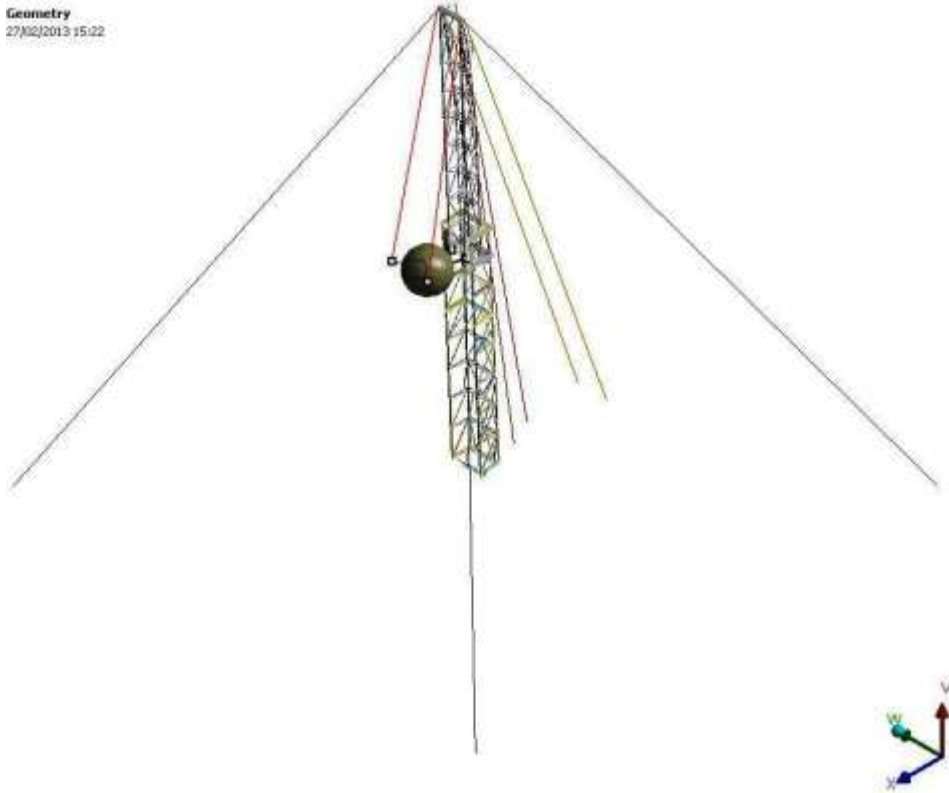


Figura 3.5 – Estrutura completa da sonda sem tubos estaleirados

A Figura 3.6, ilustra o modelo da sonda de produção terrestre com tubos estaleirados.

Geometry
27/02/2013 15:24

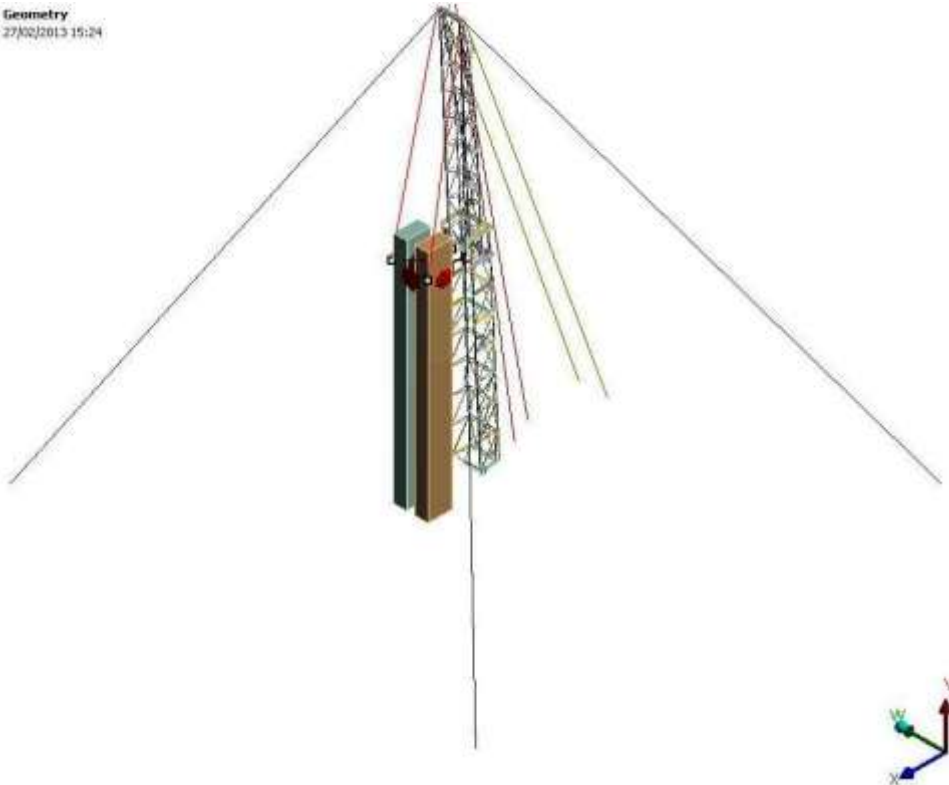


Figura 3.6 – Estrutura completa da sonda com tubos estaleirados

A mesa do torrasta foi substituída por sua massa equivalente distribuída nos pontos de fixação da mesma na estrutura do mastro superior e espias de suporte. Para esta simplificação é utilizado o recurso *Point Mass* do ANSYS, conforme ilustrado na Figura 3.7.

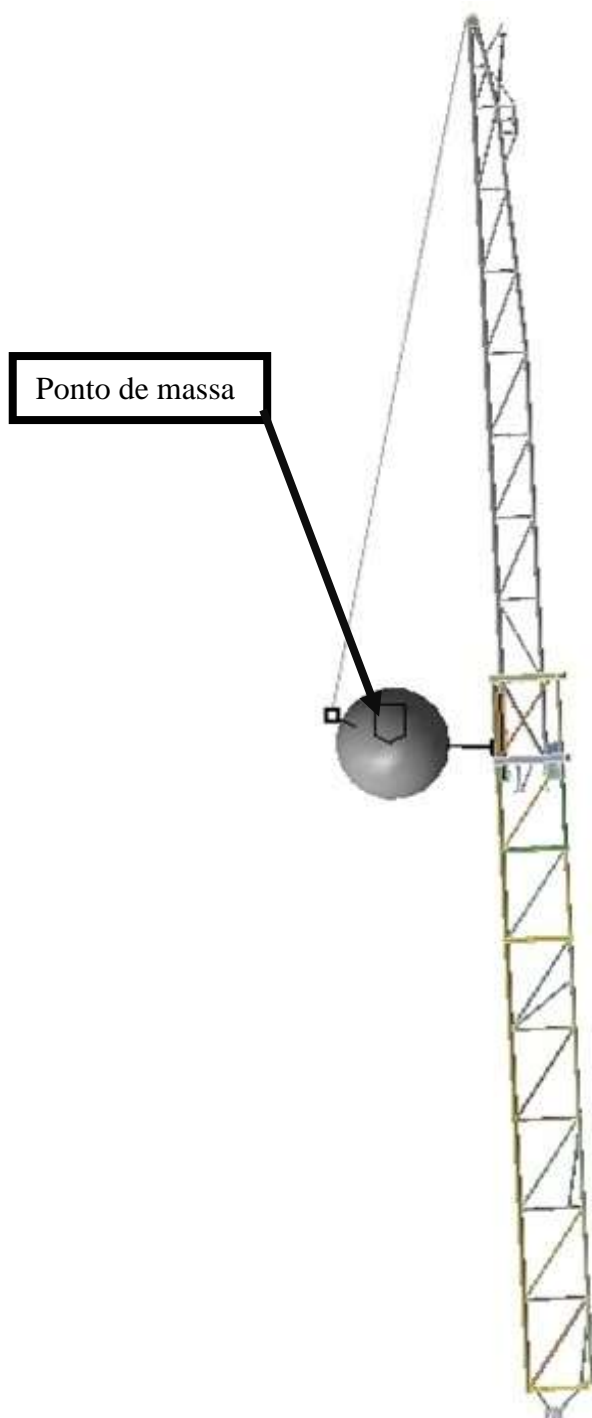


Figura 3.7 – Mesa do torrasta substituído pelo ponto de massa

Também foram desconsiderados os acessórios fixados à estrutura da sonda. (ex. cilindro de extensão, cilindros auxiliares, cabos de aço da linha morta, rápida e catarina).

As espias de vento e de carga, utilizadas na estrutura, são modeladas como linhas, para posterior utilização de elementos de viga no ANSYS.

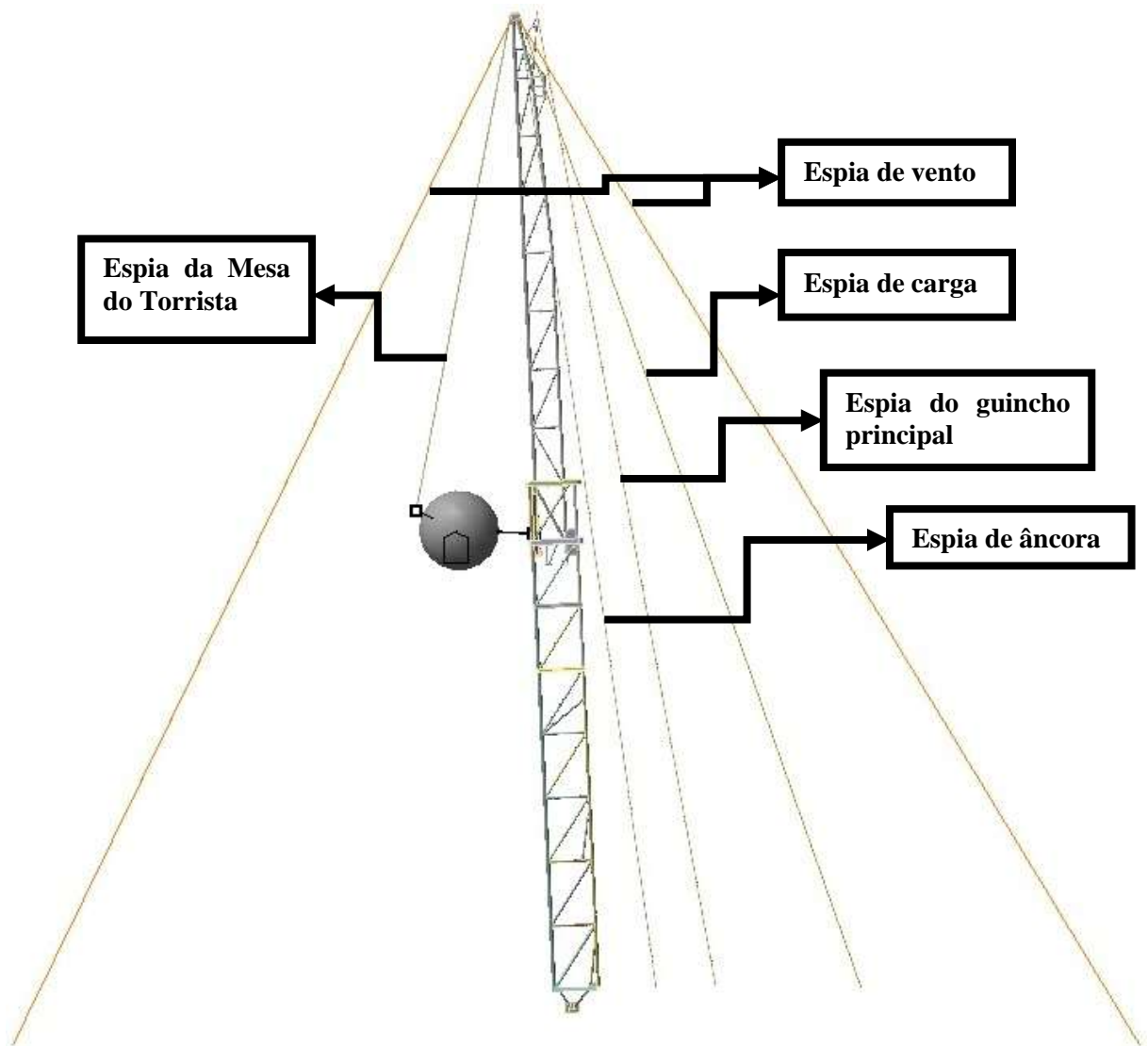


Figura 3.8 – Espias modeladas com elementos de viga

Tubos e chapas foram modelados em 3D, sendo estes tratados posteriormente no software ANSYS *Design Modeler* para transformação dos perfis em superfícies para posterior utilização de elementos de casca no ANSYS, conforme ilustrado na Figura 3.9.

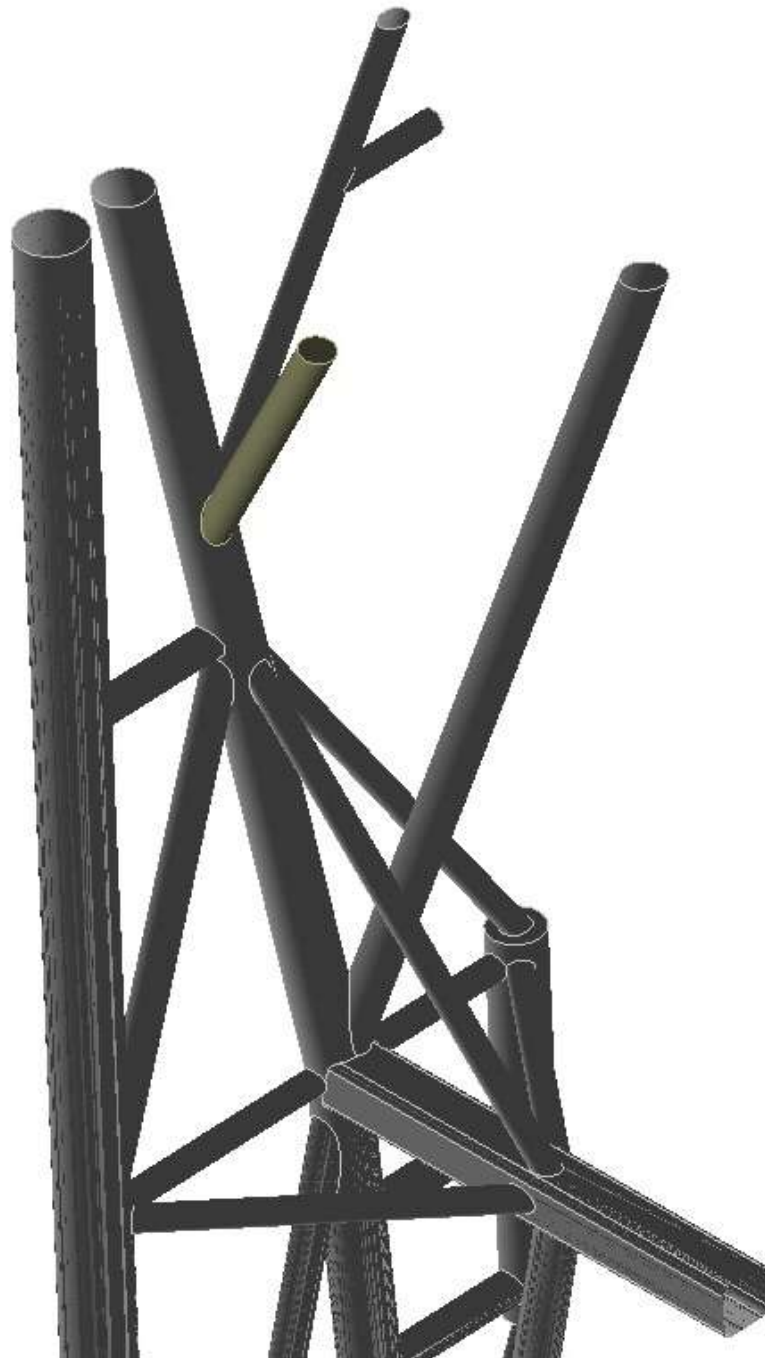


Figura 3.9 – Componentes modelados com elementos de casca

3.4 CONDIÇÕES DE CONTORNO E CARREGAMENTOS

As simulações descritas neste estudo visam reproduzir as condições de operação de uma sonda de produção terrestre em campos brasileiros, conforme critérios aplicáveis do item 7 da norma API Spec 4F - 3ª edição: 2008.

3.4.1 Resumo das condições de contorno e carregamentos

Na Tabela 3.2, encontram-se o resumo das condições de carregamentos utilizados para avaliação da estrutura do mastro da sonda de produção terrestre.

Tabela 3.2 – Carregamentos de Projeto, conforme API Spec 4F – 3ª edição:2008

Hipótese	Condição	Peso Estrutura	Tubos Estaleirados	Carga de Içamento	Pré-carga nas Espias de Vento	Carga de Vento
A	Operação	X	X	X	X	-
B	Operação	X	-	X	X	-
C	Operação	X	X	X	X	X
D	Operação	X	-	X	X	X
E	Inesperado	X	X	-	X	X
F	Esperado	X	-	-	X	X

As simulações realizadas nestes estudos foram realizadas considerando uma temperatura de referência de 40°C.

O carregamento especificado originalmente pelo projeto de é 1334,4 kN (300 klbf), entretanto, para a condição de operação (Hipóteses A, B, C e D), o equipamento foi avaliado em patamares menores de carregamento de içamento estático. Para as condições de vento inesperado e esperado (Hipóteses E e F), respectivamente, também foram avaliados os esforços atuantes na estrutura considerando três patamares de carregamento de vento.

Na Tabela 3.3, são ilustrados as condições e os valores dos carregamentos utilizados em cada hipótese avaliada.

Tabela 3.3 – Valores dos carregamentos de projeto da sonda de produção terrestre

Hipótese	Condição	Tubos Estaleirados	Máxima Carga de Içamento Estático (kN) / [klbf]	Pré-carga nas Espias de Vento (kN) / [lbf]	Carga de Vento (m/s) / [knots]
A	Operação	Sim	(1334,4) / [300]	(4,448) / [1000]	0
			(889,6) / [200]		
			(444,8) / [100]		
B	Operação	Não	(1334,4) / [300]	(4,448) / [1000]	0
			(889,6) / [200]		
			(444,8) / [100]		
C	Operação	Sim	(1334,4) / [300]	(4,448) / [1000]	(12,86) / [25]
			(889,6) / [200]		
			(444,8) / [100]		
D	Operação	Não	(1334,4) / [300]	(4,448) / [1000]	(12,86) / [25]
			(889,6) / [200]		
			(444,8) / [100]		
E	Inesperado	Sim	-	(4,448) / [1000]	(38,58) / [75]
			-		(30,86) / [60]
			-		(25,72) / [50]
F	Esperado	Não	-	(4,448) / [1000]	(30,86) / [60]
			-		(25,72) / [50]
			-		(20,57) / [40]

3.4.2 Condições de contorno e carregamentos

Nas figuras a seguir estão ilustradas as condições de contorno e carregamentos aplicados nas simulações.

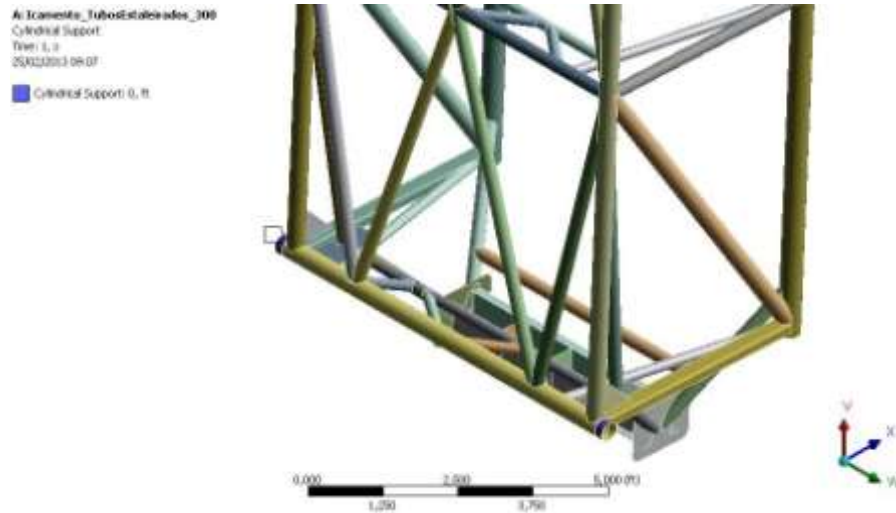


Figura 3.10 – Restrição da estrutura

Condição: Restrição de movimento de translação em qualquer direção.

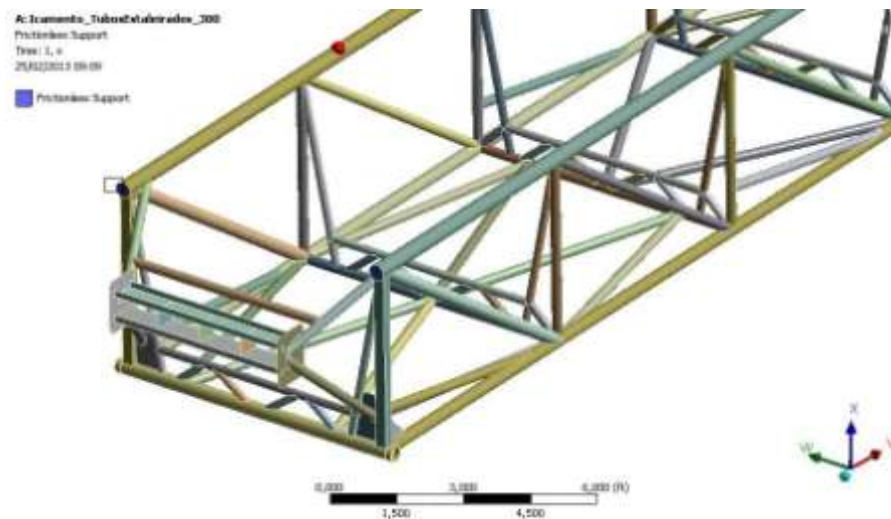


Figura 3.11 – Restrição da parte inferior do mastro

Condição: Restrição de movimento de translação na direção V da parte inferior do mastro.

B: Icamento_TubosEstaleirados_PreCarga_300

Standard Earth Gravity

Time: 2, s

25/02/2013 13:55

Standard Earth Gravity: 32,174 ft/s²
Components: -32,174;0,;0, ft/s²

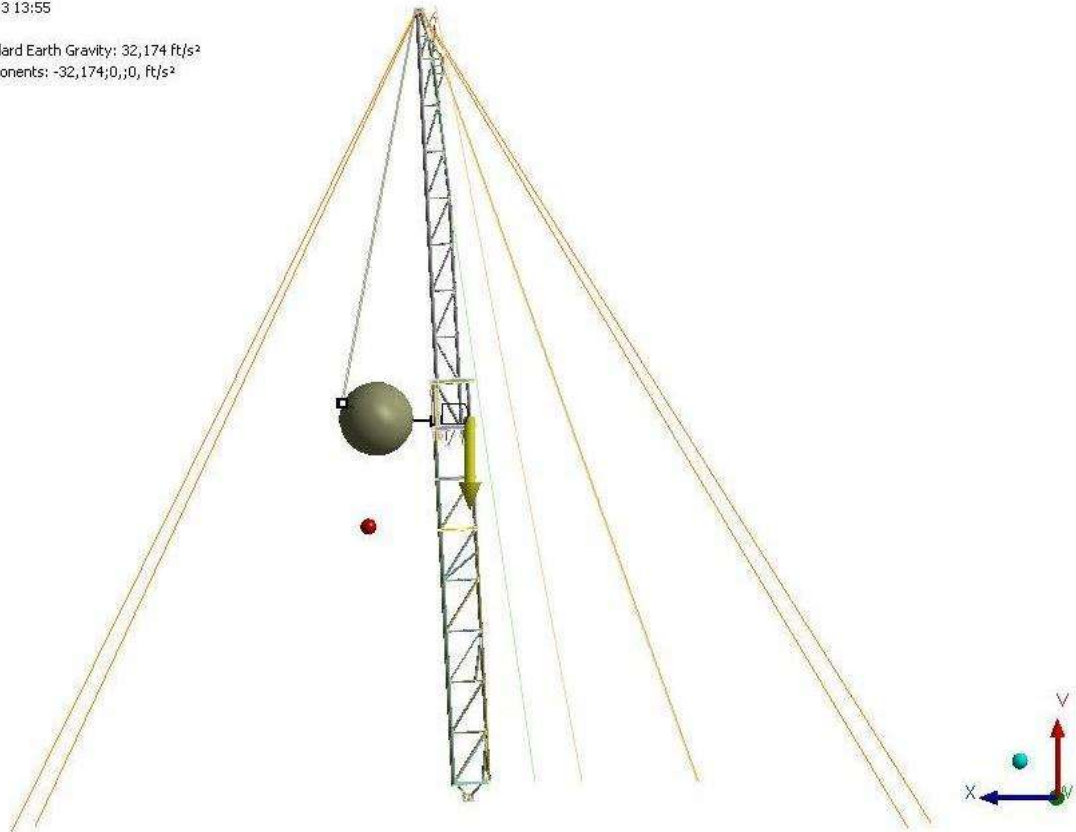


Figura 3.12 – Aplicação da aceleração da gravidade

Condição: Aplicação da aceleração da gravidade na direção vertical da sonda.

Conforme descrito nas especificações originais de projeto, a capacidade de carregamento estática máxima da sonda é igual a 1.334.466,48 N (300.000 lbf), distribuída através de 8 linhas de carga. Essas linhas passam pela Catarina e o bloco de coroamento, com suas extremidades ancoradas na subestrutura e identificadas como espia de linha rápida “*Fastline*” e linha morta ou âncora “*Deadline*”, conforme ilustra a Figura 3.13.

A: Icamento_PreCarga_300

Force_Fastline

Time: 2, s

27/02/2013 16:15

A Force: 3,e+005 lbf

B Force_Fastline: 37500 lbf

C Force_Deadline: 37500 lbf



Figura 3.13 – Aplicação do carregamento de içamento

Condição A: Aplicação do carregamento da carga máxima estática de içamento;

Condição B: Aplicação do carregamento suportado pela linha rápida “Fastline”;

Condição C: Aplicação do carregamento suportado pela linha morta “Deadline”.

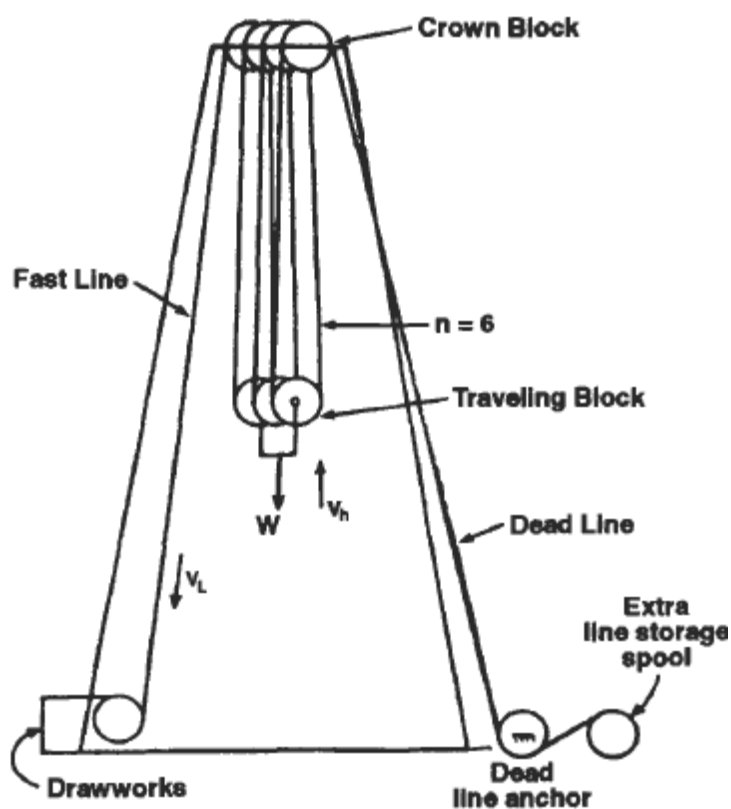


Figura 3.14 – Sistema simplificado do sistema de elevação de carga [Adaptado Lyons (1996)]

A carga suportada pelas espigas da linha rápida e linha morta é definida a partir da carga máxima estática dividida pelo número de linhas que passam pela Catarina, conforme LYONS (1996, pág. 524). Sendo assim, temos:

$$P_l = \frac{P}{N}$$

Onde:

P_l : Carga máxima estática nas linhas rápida e morta [lbf];

P : Carga máxima estática da sonda [lbf];

N : Número de linhas da Catarina.

O carregamento de vento é decorrente do efeito causado pela ação do vento sobre a estrutura sendo distribuído por toda a estrutura do mastro. No presente estudo, a estrutura foi analisada na direção do vento (θ) mais crítica, ou seja, 114° , conforme ilustra a Figura 3.15. O APÊNDICE A, descreve o estudo detalhado para determinação desta condição.



Figura 3.15 – Carregamento devido ação do vento somente no mastro

Condição: Aplicação do carregamento devido ação do vento somente no mastro da sonda, sem tubos estaleirados.

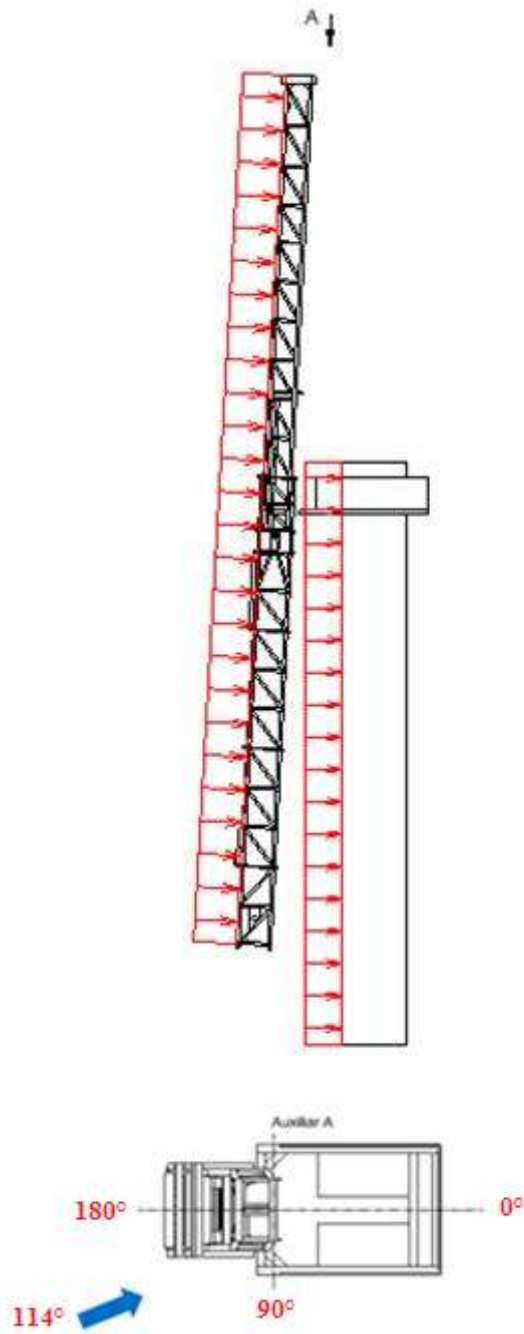


Figura 3.16 – Carregamento devido a ação do vento aplicado sob a estrutura e os tubos estaleirados

Condição: Aplicação do carregamento devido ação do vento na estrutura e tubos estaleirados.

B: Icamento_TubosEstaleirados_PreCarga_300

Espia_Vento 4

Time: 2, s

25/02/2013 09:17

- A** Espia_Vento: Lock
- B** Espia_Vento 2: Lock
- C** Espia_Vento 3: Lock
- D** Espia_Vento 4: Lock

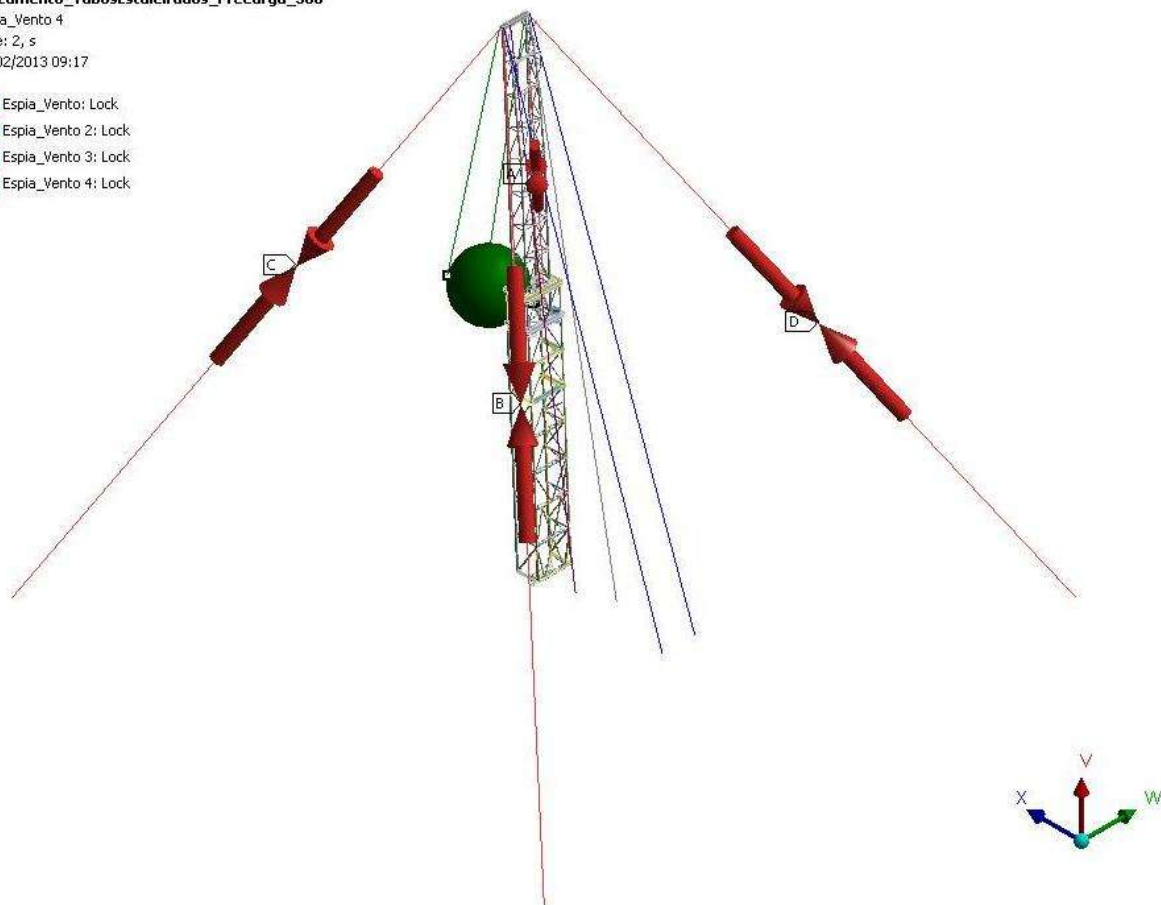


Figura 3.17 – Configuração de pré-carga nas espias de vento

Condição: Aplicação da pré-carga nas espias de vento.

Para este trabalho adotou-se um valor de 4,448 kN (1000 lbf), conforme sugerido pela bibliografia (Lyons, 1996) e norma API RP 4G – 3ª Edição: 2004.

3.5 MODELO DE ELEMENTOS FINITOS

3.5.1 Contatos

As análises que se encontram neste estudo são lineares, para condições de contato e de materiais. Foram utilizados contatos do tipo *Joints*.

As *Joints* são condições de suporte/contato que não permitem translação relativa e nem movimentos rotacionais entre dois elementos/pontos conectados. Esta condição é utilizada em regiões onde as espias estão conectadas.

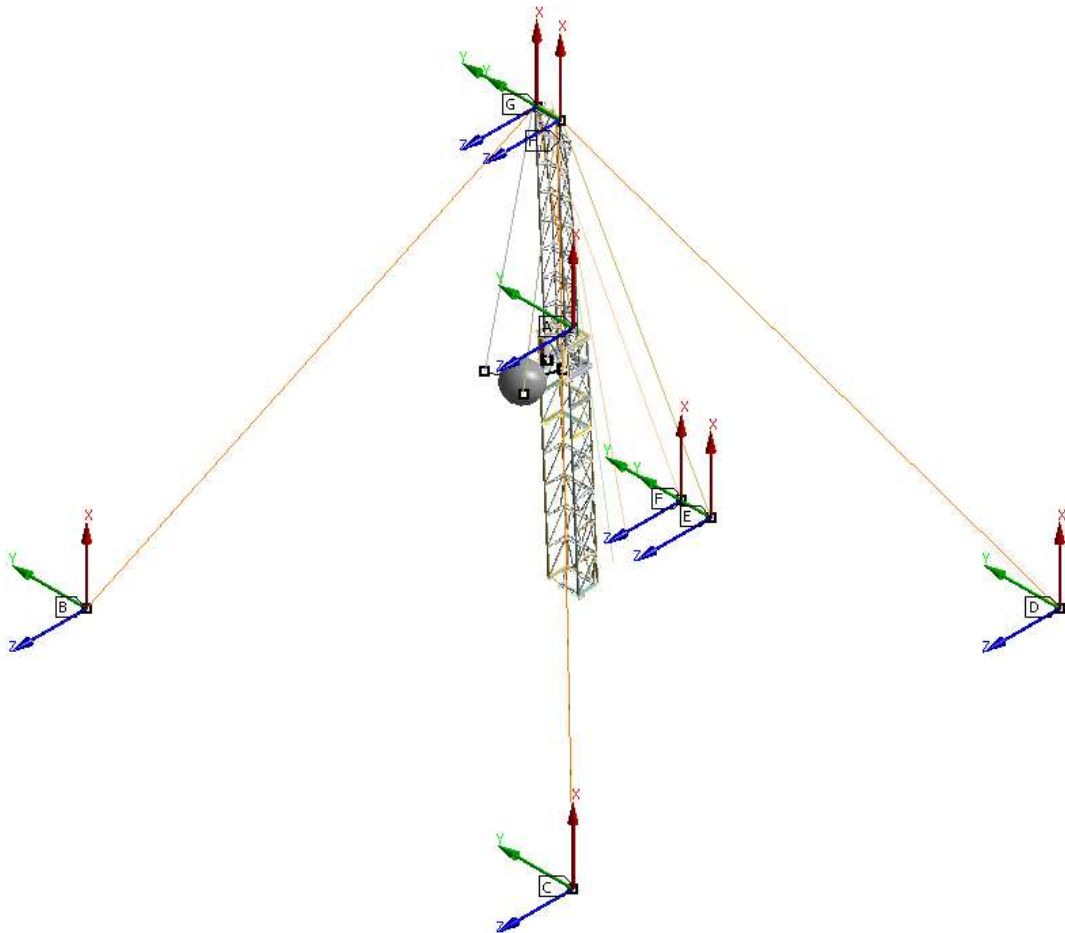


Figura 3.18 – Exemplo de regiões onde foram utilizadas restrições do tipo joint

3.5.2 Malha de elementos finitos

Conforme descrito no item 2.5 o modelo de malha é composta por elementos de viga, casca, hexaédricos e tetraedros. As malhas utilizadas nas simulações tiveram uma pequena variação, mas, no âmbito geral, a malha ficou com aproximadamente 357.770 nós e 345.772 elementos.

A Tabela 3.4, ilustra os tipos de elementos utilizados nos diversos componentes da estrutura do mastro da sonda.

Tabela 3.4 – Tipos de elementos utilizados nas análises

Tipo de Elemento	Componente da Estrutura da Sonda
Viga	Espias de Vento / Espias de Carga / Linha Morta ou Âncora “ <i>Deadline</i> ” / Linha do Guincho Principal “ <i>Fastline</i> ”
Casca	Tubos / Chapas / Perfis
Hexaédrico	Componentes Sólidos

A Figura 3.19, ilustra a malha gerada no conjunto da sonda de produção terrestre.

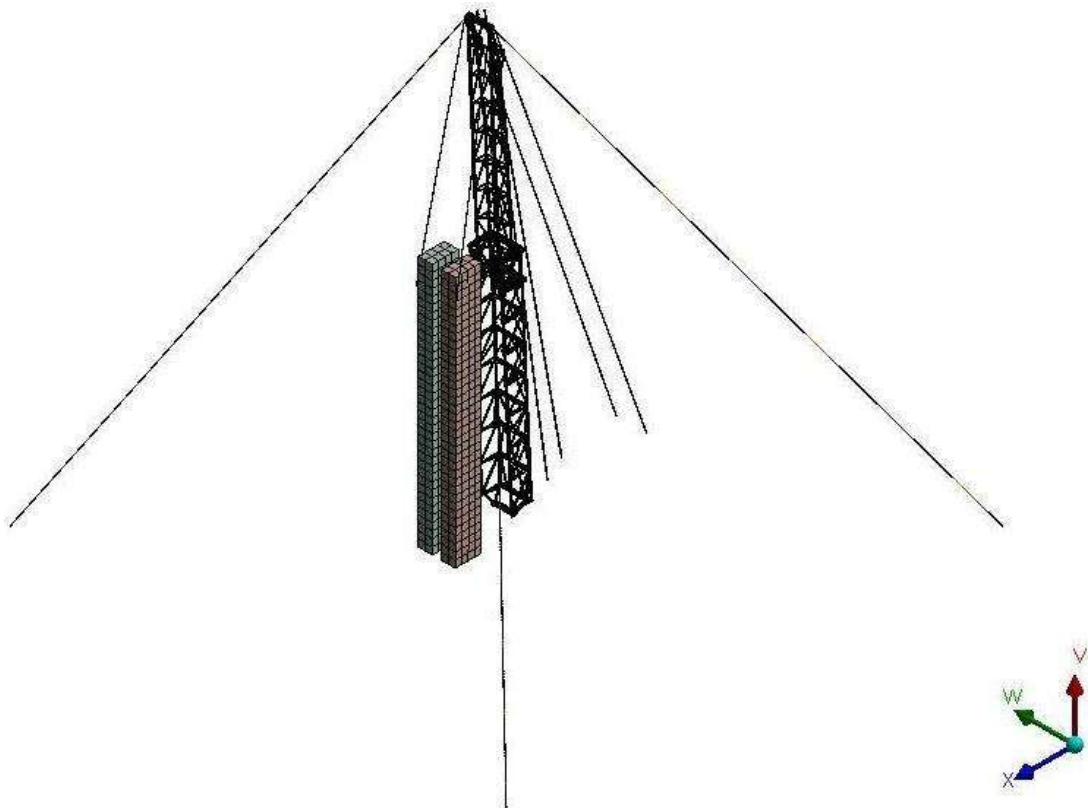


Figura 3.19 – Malha gerada na estrutura

A Figura 3.20, ilustra detalhes da malha na região do bloco de coroamento.

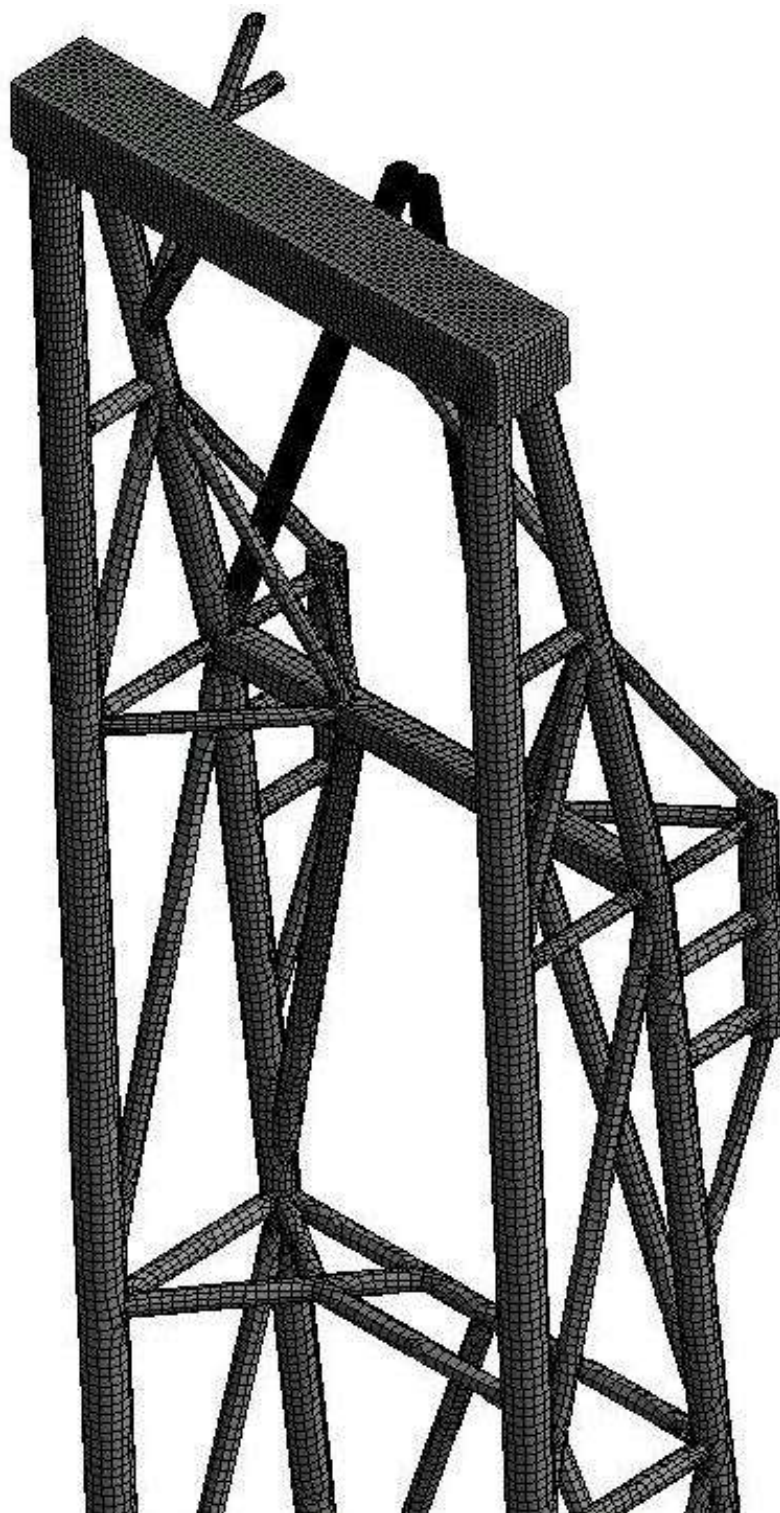


Figura 3.20 – Detalhe da malha na região do bloco de coroamento

A Figura 3.21, ilustra detalhes da malha na região próxima a mesa do torrasta.

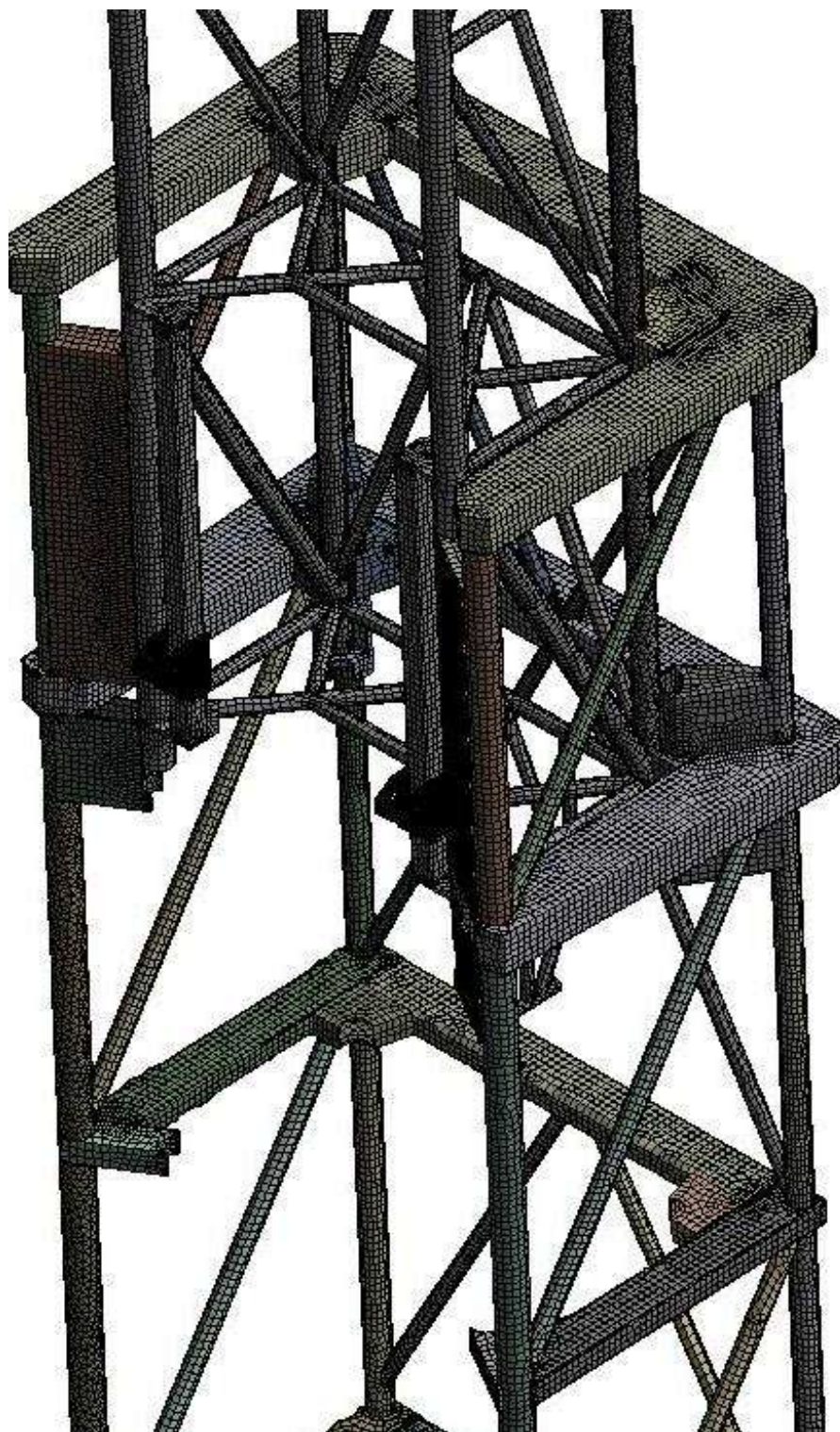


Figura 3.21 – Detalhe da malha na região próximo a mesa do torrasta

A Figura 3.22, ilustra detalhes da malha na parte inferior da estrutura.

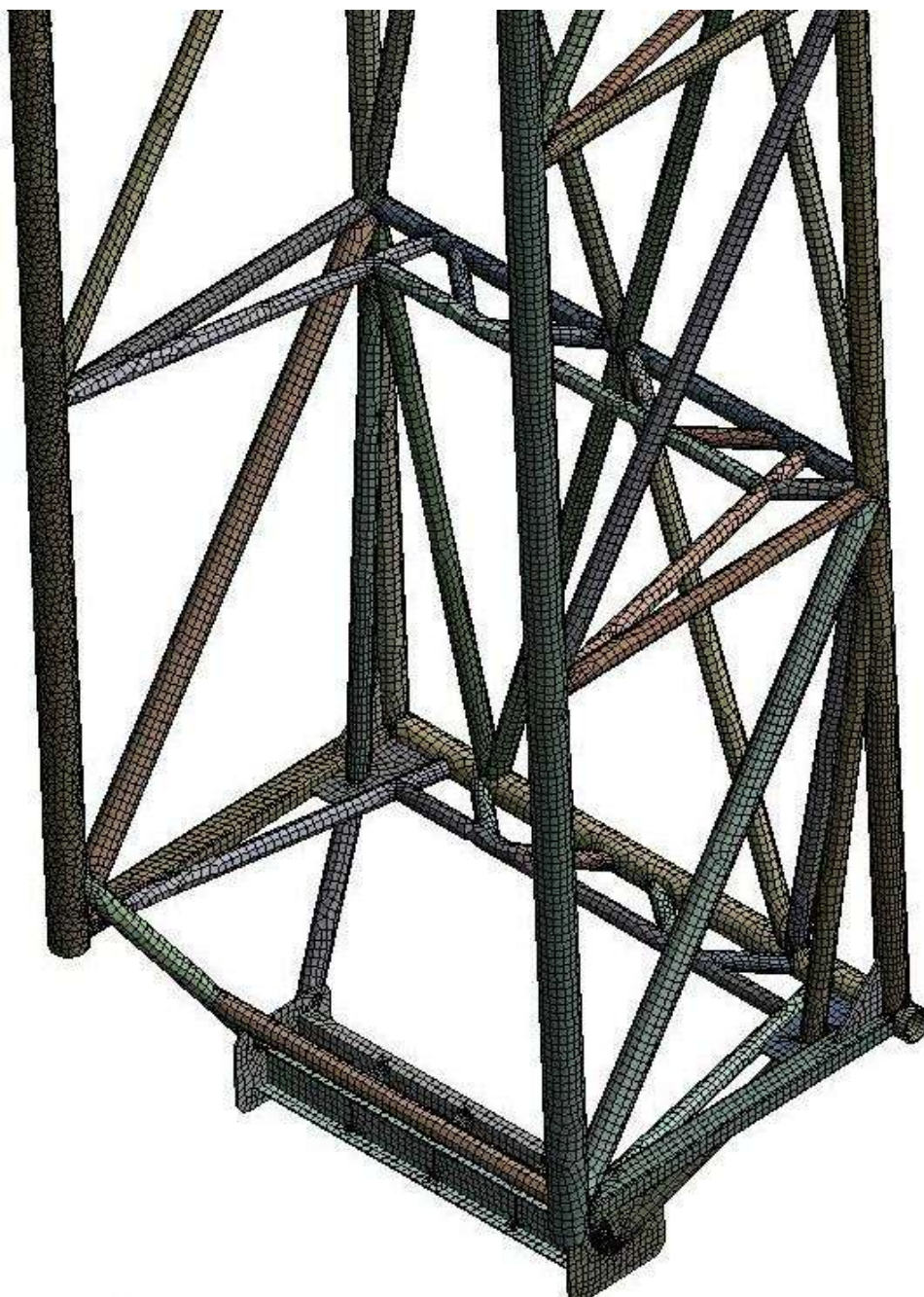


Figura 3.22 – Detalhe da malha na parte inferior da estrutura.

3.6 CRITÉRIOS DE ANÁLISE

Neste estudo, a estrutura do mastro da sonda será analisada conforme recomendações e requisitos da norma API Spec 4F - 3ª Ed.: 2008.

A norma API Spec 4F - 3ª Ed.: 2008 menciona que as tensões devem ser analisadas conforme método da seção Projeto por tensão admissível (*Allowable Stress Design - ASD*) da norma AISC 335-89, comumente referida como Projeto Elástico (*Elastic Design*).

A norma AISC 335-89 foi incorporada a norma AISC 360-10. Desta forma, será utilizada a versão mais recente da norma, ou seja, AISC 360-10.

A tensão na estrutura do mastro da sonda de produção terrestre não deve exceder 1,67 do valor de tensão de escoamento do material do componente analisado. A estrutura do mastro da sonda será avaliada segundo a tensão equivalente de von Mises e comparada com o limite admissível aplicável.

Na Tabela 3.5, são ilustrados os limites de tensões admissíveis dos componentes do mastro.

Tabela 3.5 – Limite de tensões admissíveis

Componente	Tipo de Perfil	Material	Tensão de Escoamento [MPa]	Tensão Admissível [MPa]
Colunas	Tubos	ASTM A500 Grau C	315	149,2
Contraventamento	Tubos	ASTM A500 Grau C	315	188
Perfis	I e U	ASTM A36	250	149,7
Chapas	-	ASTM A36	250	149,7

Para as colunas considerando um coeficiente de segurança de 1,67 a máxima tensão admissível seria de 188 MPa. Entretanto, verificou-se que a tensão crítica de flambagem é inferior a 188 MPa, desta forma, sendo que o modo principal de falha das colunas é flambagem, a tensão máxima admissível não deve exceder 149,2 MPa, conforme descrito no APÊNDICE B.

4 RESULTADOS E DISCUSSÃO

Nas seções a seguir são ilustrados os resultados de deslocamentos e tensões da estrutura do mastro da sonda de produção terrestre para cada condição de combinação de carregamento, conforme mencionado pela norma API Spec 4F – 3ª Edição:2008.

4.1 RESULTADOS PARA CONDIÇÃO DE OPERAÇÃO - HIPÓTESE A

A hipótese A consiste na avaliação da estrutura do mastro da sonda de produção terrestre na condição de operação sem a aplicação da ação do vento sobre a estrutura com tubos estaleirados, conforme descrito na Tabela 3.2.

Na Figura 4.1, Figura 4.2 e Figura 4.3, são apresentados os gráficos de deslocamento máximo, tensões equivalentes e regiões que excedem o limite admissível de tensões, respectivamente.

Os gráficos de variação do deslocamento e variação do coeficiente de segurança em função da variação do carregamento de içamento estático são ilustrados na Figura 4.4 e Figura 4.5, respectivamente.

CARREGAMENTO DE IÇAMENTO

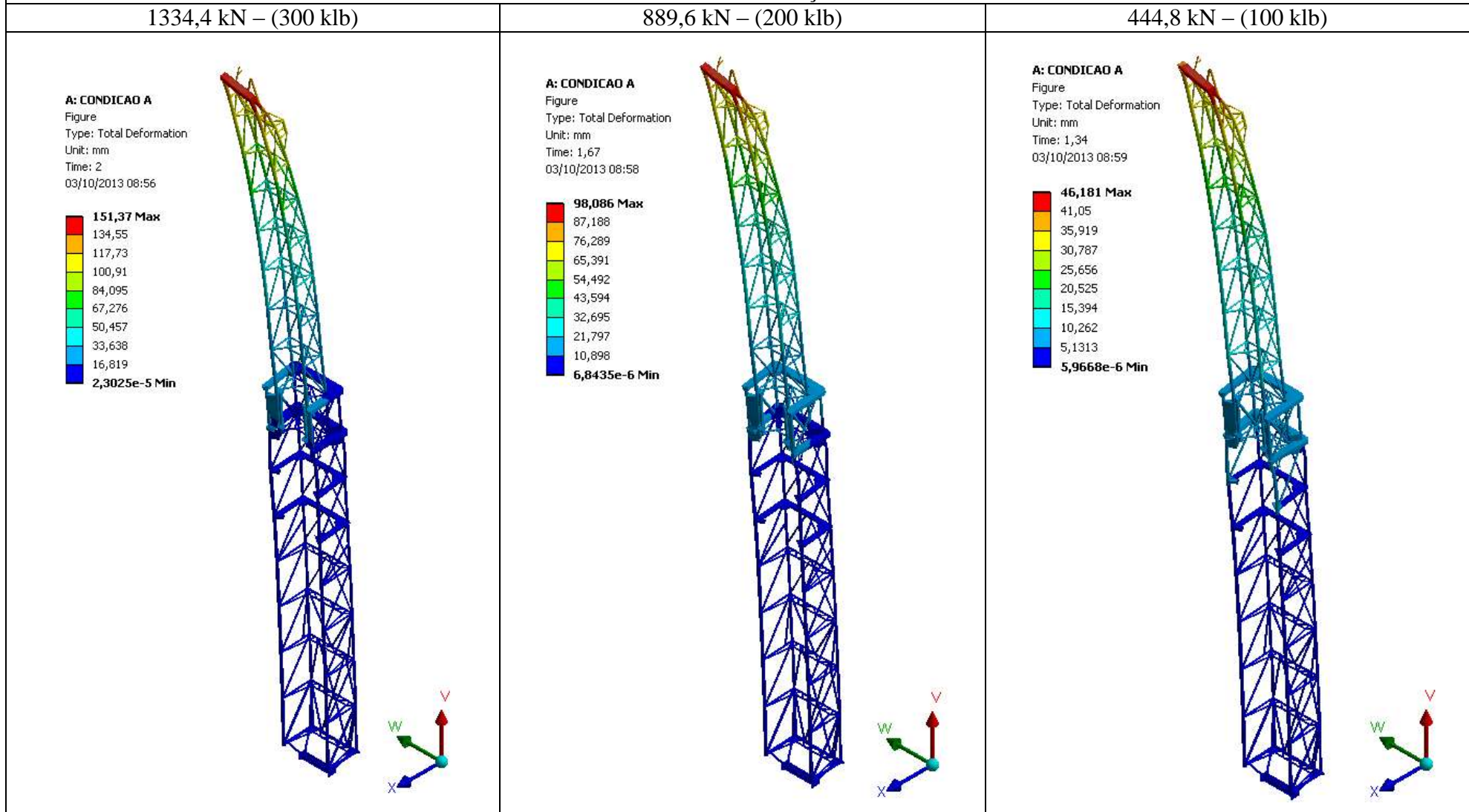


Figura 4.1 – Deslocamento total da estrutura (escala de deformação: 50x)

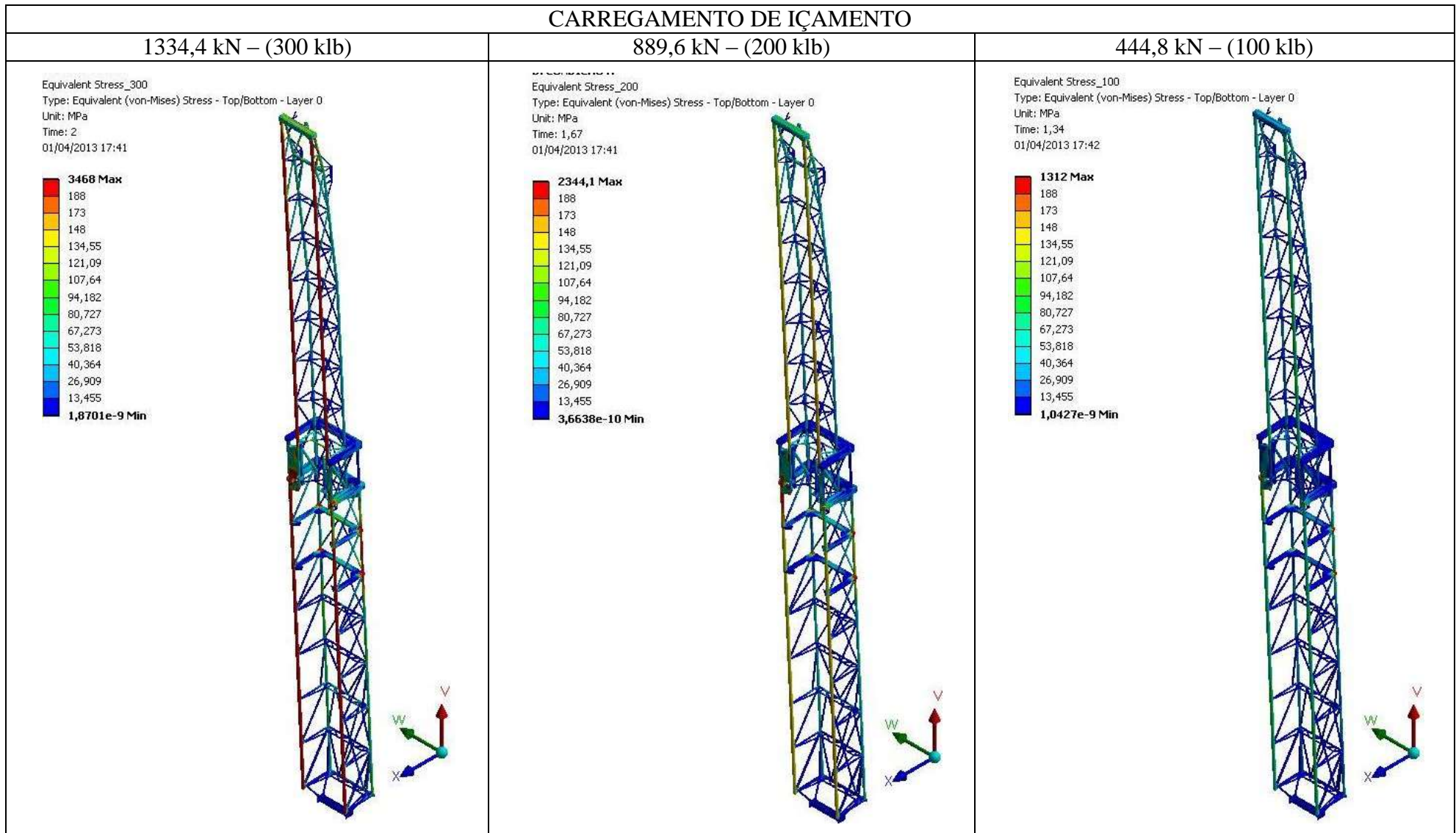


Figura 4.2 - Gradiente de tensões na estrutura do mastro

CARREGAMENTO DE IÇAMENTO

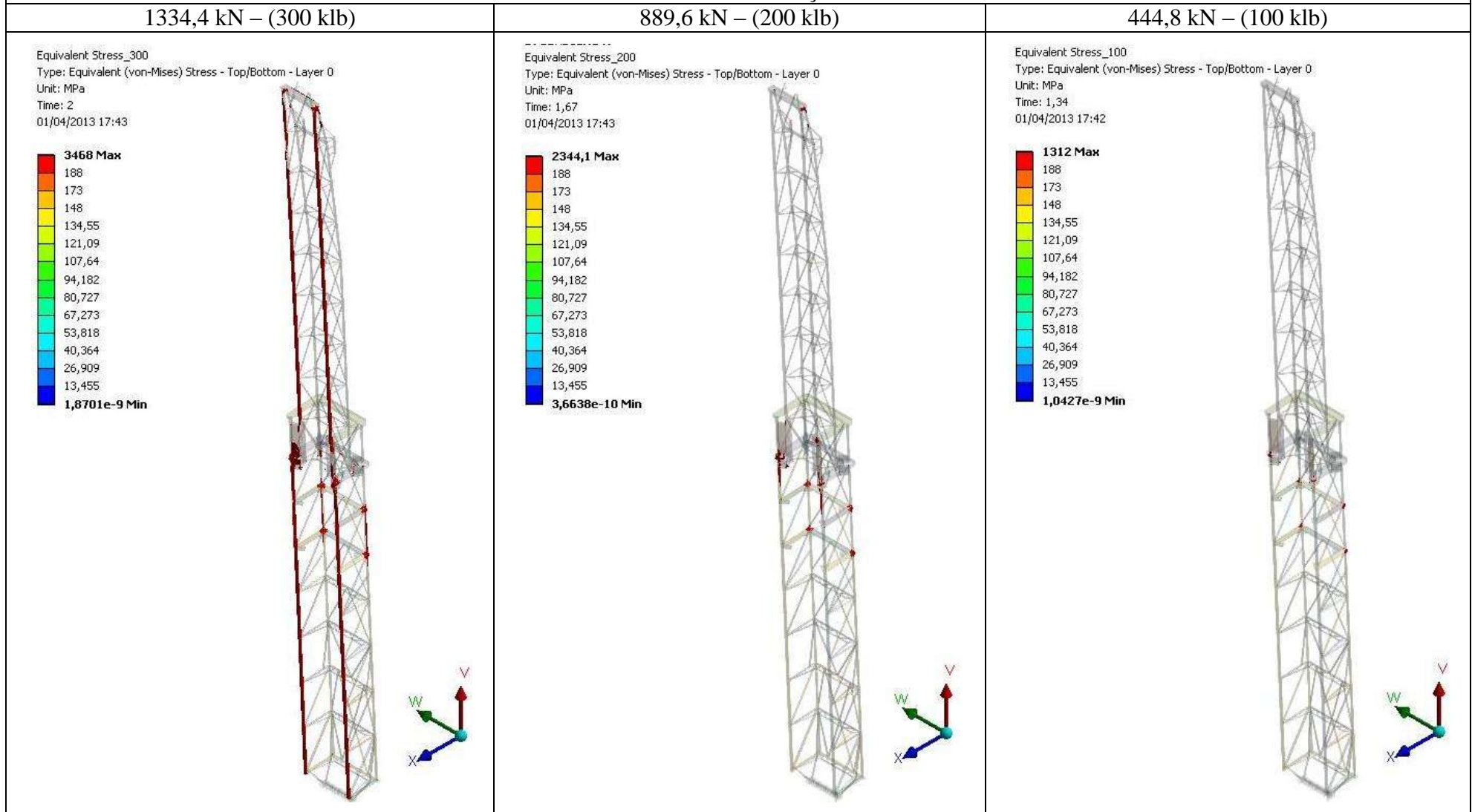


Figura 4.3 – Regiões acima do limite admissível

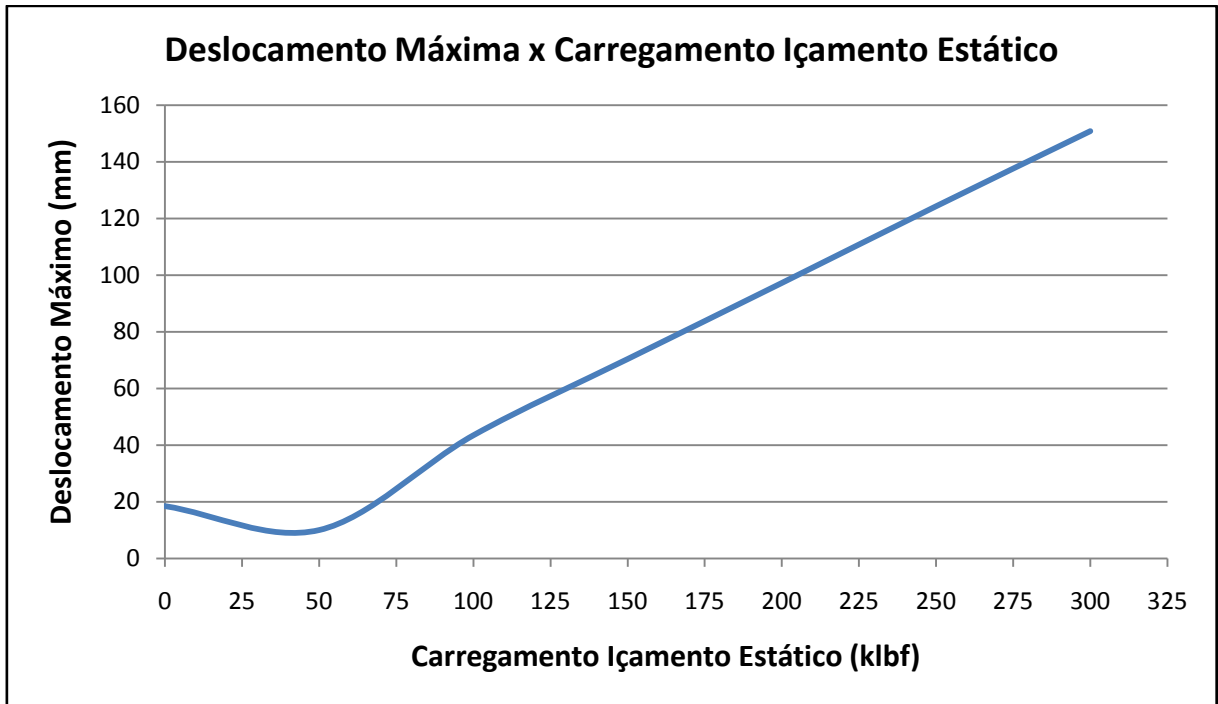


Figura 4.4 – Variação do Deslocamento x Carregamento de Içamento Estático para Hipótese A

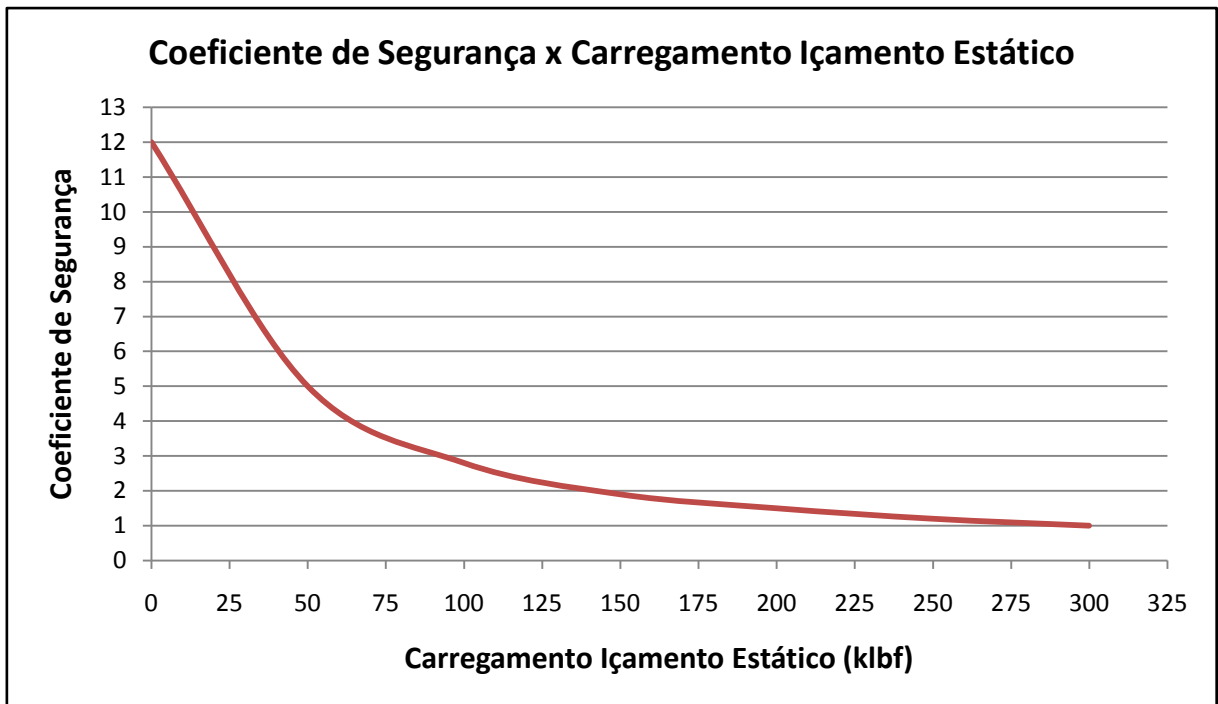


Figura 4.5 – Variação do Coeficiente de Segurança x Carregamento de Içamento Estático para Hipótese A

Conforme ilustrado na Figura 4.5, verifica-se que para valores de carregamento de içamento estático acima de 773,9 kN (174 klbf) as tensões excedem o limite admissível.

Na hipótese A, o modo principal de falha da estrutura é a flambagem, tendo nas colunas frontais seus elementos mais críticos.

4.2 RESULTADOS PARA CONDIÇÃO DE OPERAÇÃO - HIPÓTESE B

A hipótese B consiste na avaliação da estrutura do mastro da sonda de produção terrestre na condição de operação sem a aplicação da ação do vento sobre a estrutura e sem a presença de tubos estaleirados, conforme descrito na Tabela 3.2.

Na Figura 4.6, Figura 4.7 e Figura 4.8, são apresentados os gráficos de deslocamento máximo, tensões equivalentes e regiões que excedem o limite admissível de tensões, respectivamente.

Os gráficos de variação do deslocamento e variação do coeficiente de segurança em função da variação do carregamento de içamento estático são ilustrados na Figura 4.9 e Figura 4.10, respectivamente.

CARREGAMENTO DE IÇAMENTO

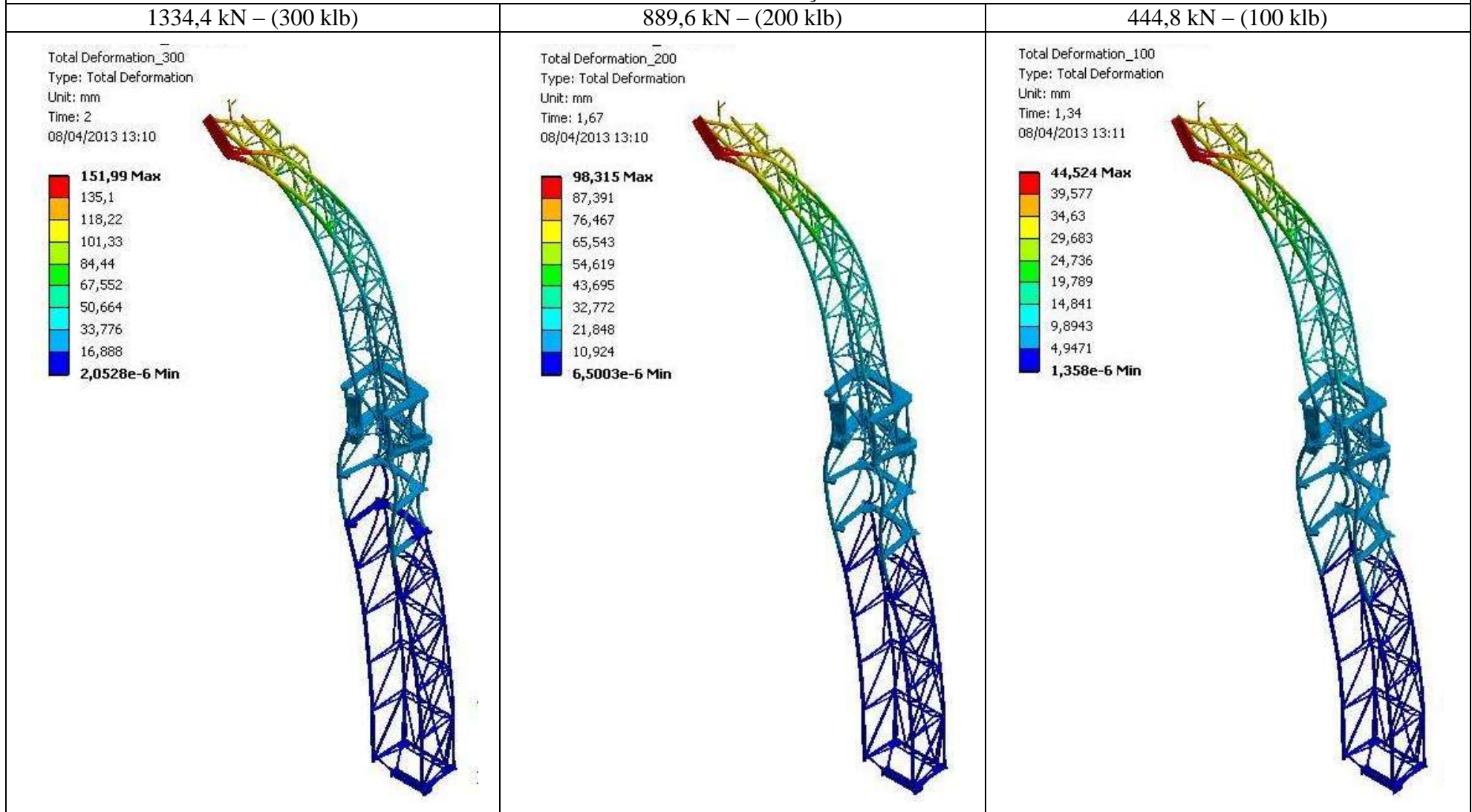


Figura 4.6 – Deslocamento total da estrutura (escala de deformação: 50x)

CARREGAMENTO DE IÇAMENTO

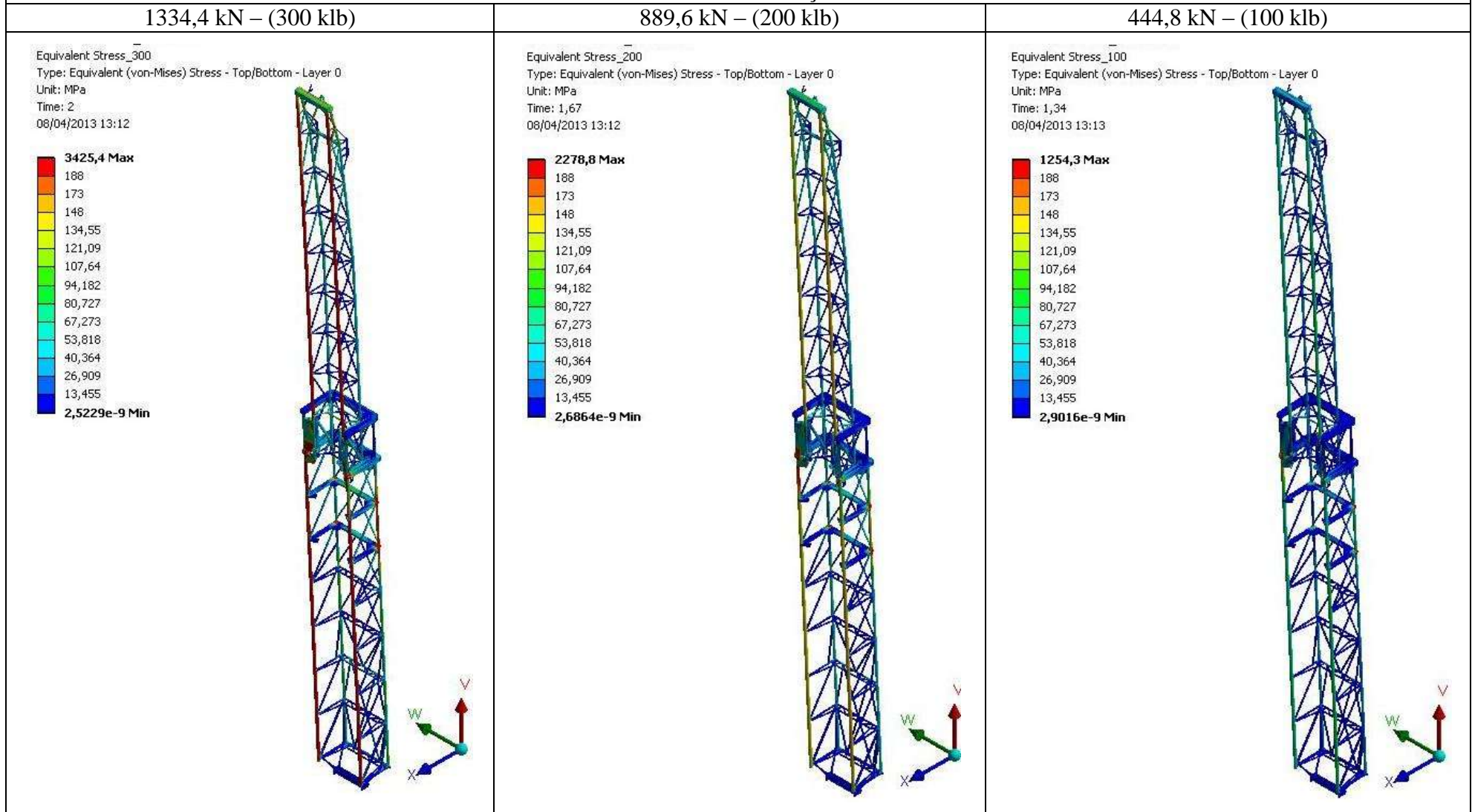


Figura 4.7 – Gradiente de tensões na estrutura do mastro

CARREGAMENTO DE IÇAMENTO

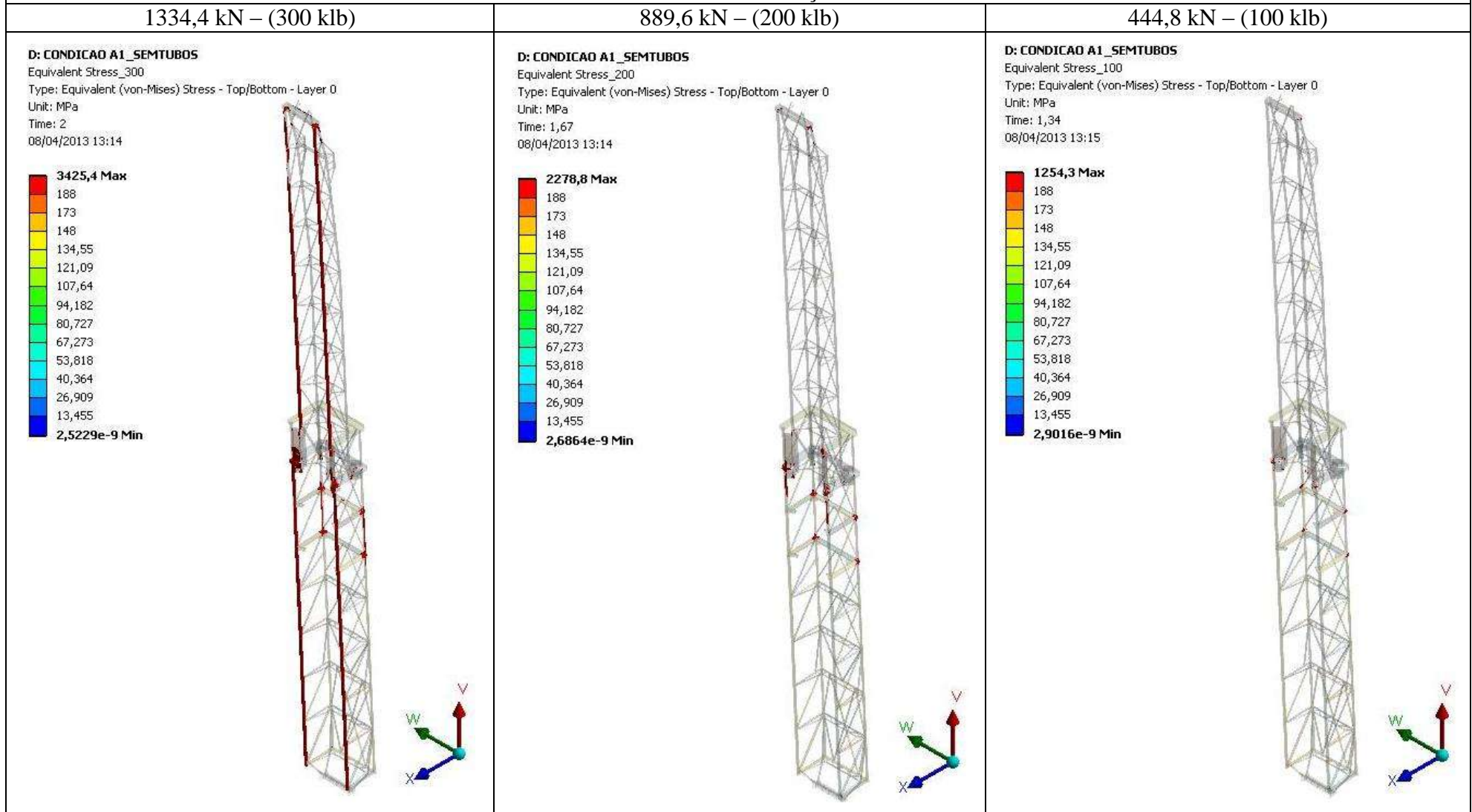


Figura 4.8 – Regiões acima do limite admissível

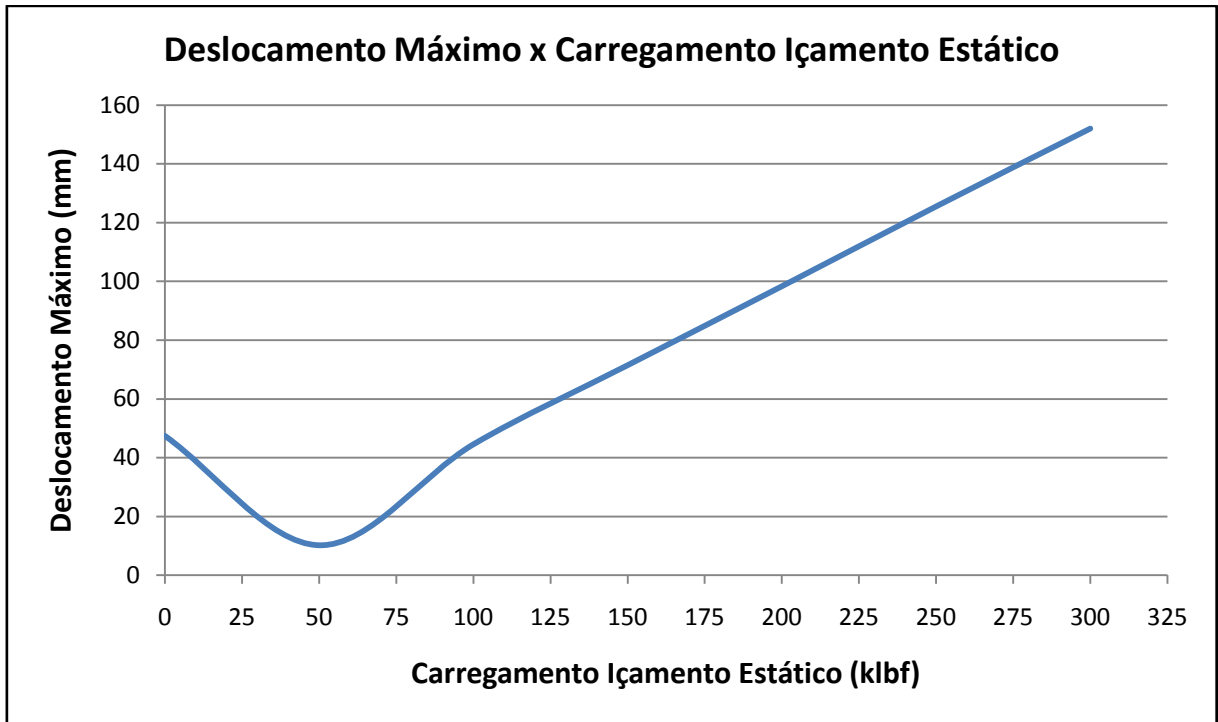


Figura 4.9 – Variação da Deformação x Carregamento de Içamento Estático para Hipótese B

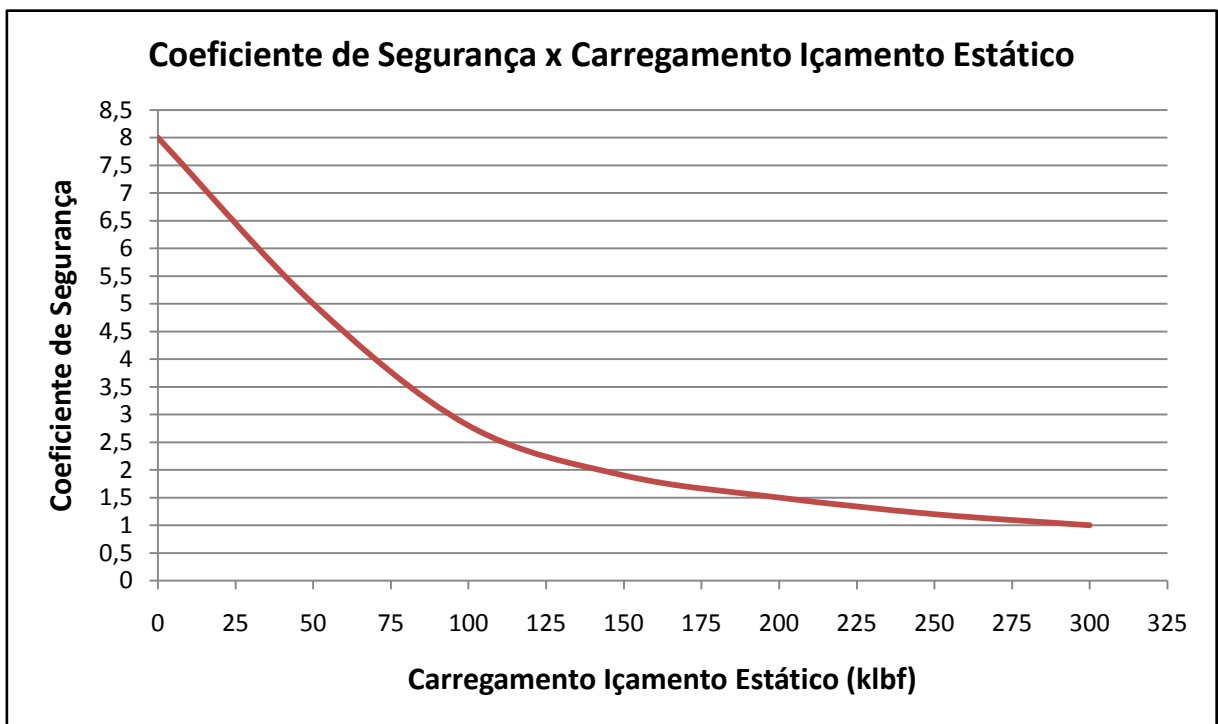


Figura 4.10 – Variação do Coeficiente de Segurança x Carregamento de Içamento Estático para Hipótese B

Conforme ilustrado na Figura 4.8, verifica-se que para valores de carregamento de içamento estático acima de 782,8 kN (176 klbf) as tensões excedem o limite admissível.

Na hipótese B, o modo principal de falha é a flambagem, tendo nas colunas frontais seus elementos mais críticos.

4.3 RESULTADOS PARA CONDIÇÃO DE OPERAÇÃO - HIPÓTESE C

A hipótese C consiste na avaliação da estrutura do mastro da sonda de produção terrestre na condição de operação com aplicação da ação do vento sobre a estrutura com tubos estaleirados, conforme descrito na Tabela 3.2.

Na Figura 4.11, Figura 4.12 e Figura 4.13, são apresentados os gráficos de deslocamento máximo, tensões equivalentes e regiões que excedem o limite admissível de tensões, respectivamente.

Os gráficos de variação do deslocamento e variação do coeficiente de segurança em função da variação do carregamento de içamento estático são ilustrados na Figura 4.14 e Figura 4.15, respectivamente.

CARREGAMENTO DE IÇAMENTO

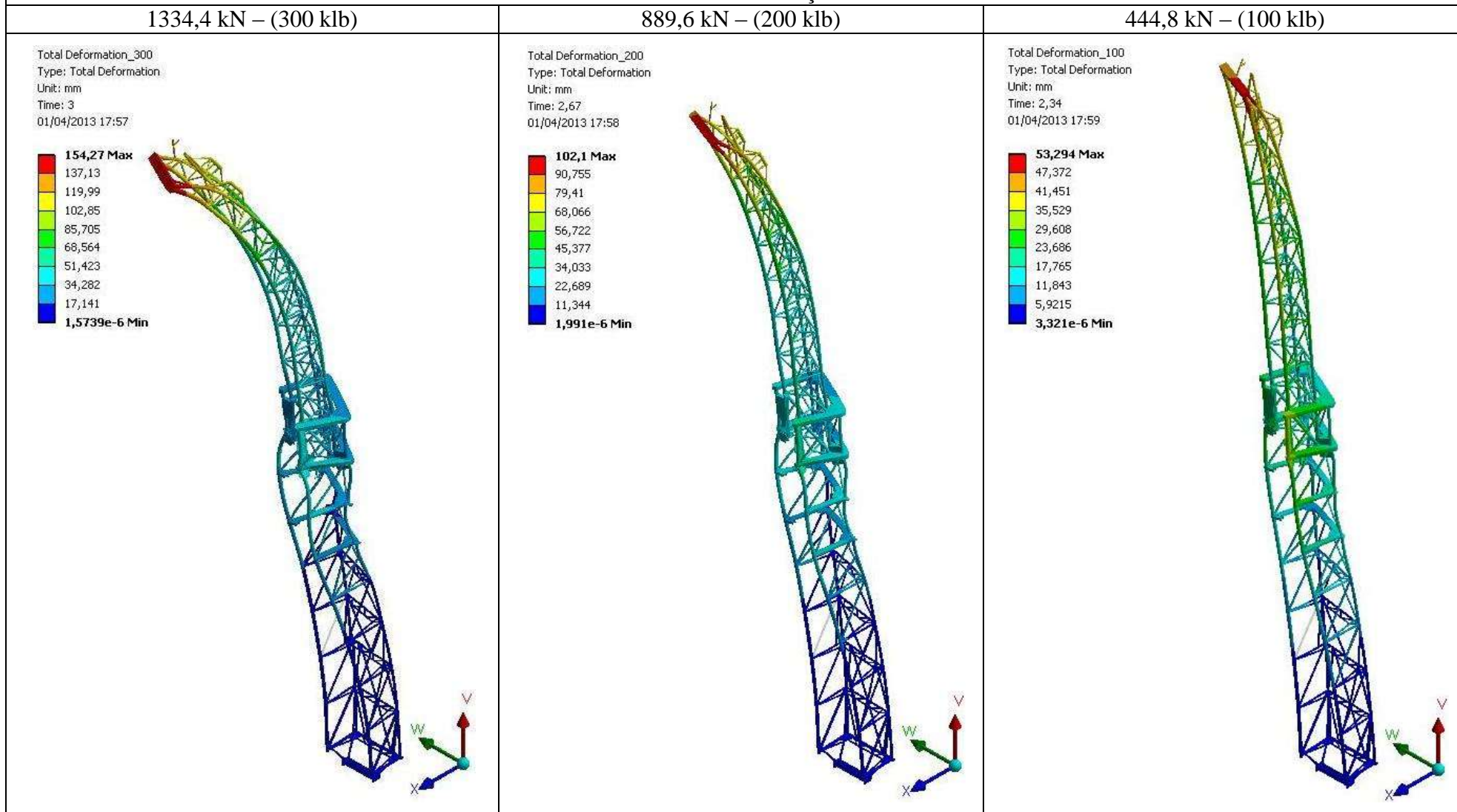


Figura 4.11 – Deslocamento total da estrutura (escala de deformação: 50x)

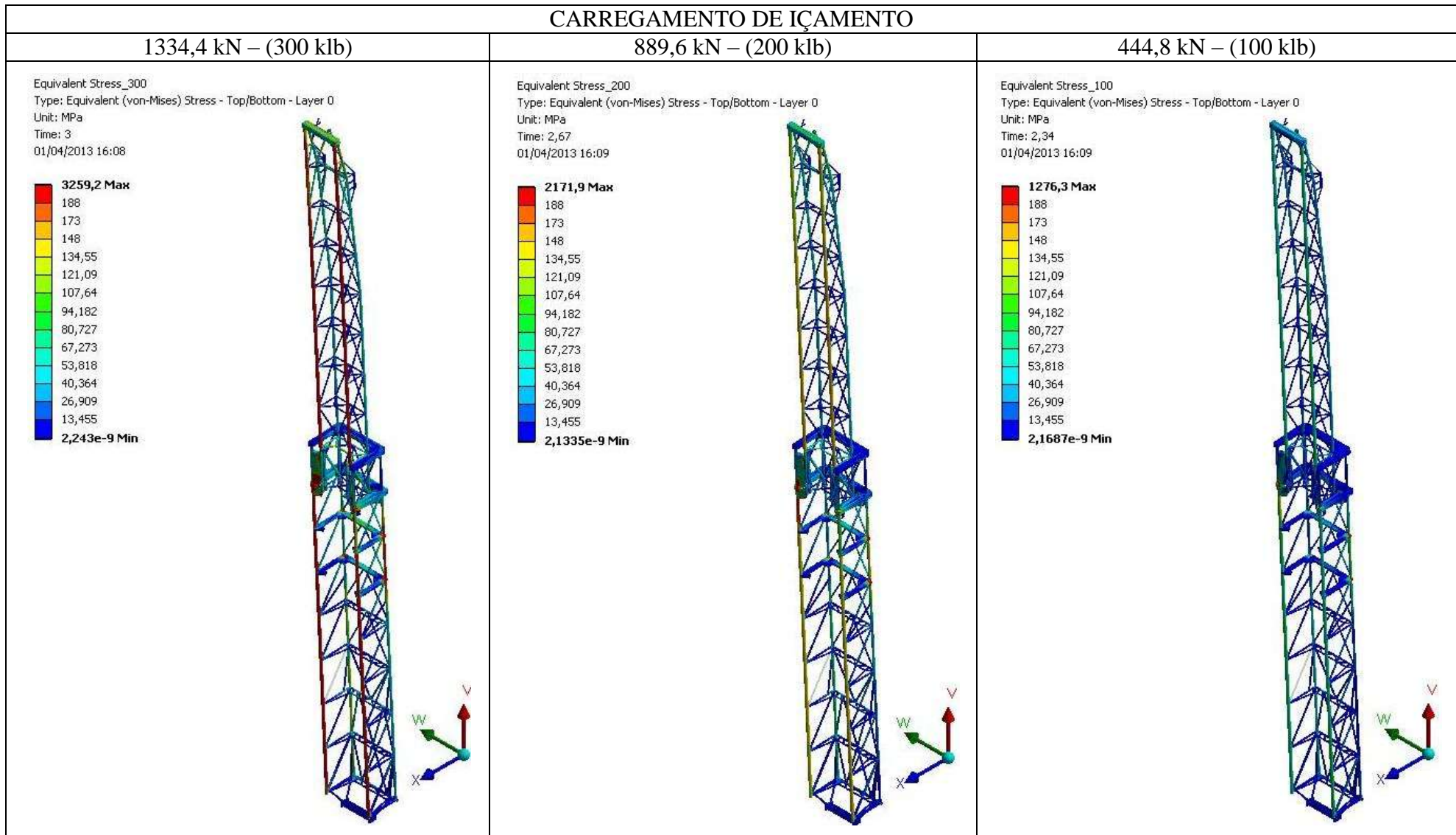


Figura 4.12 – Gradiente de tensões na estrutura do mastro

CARREGAMENTO DE IÇAMENTO

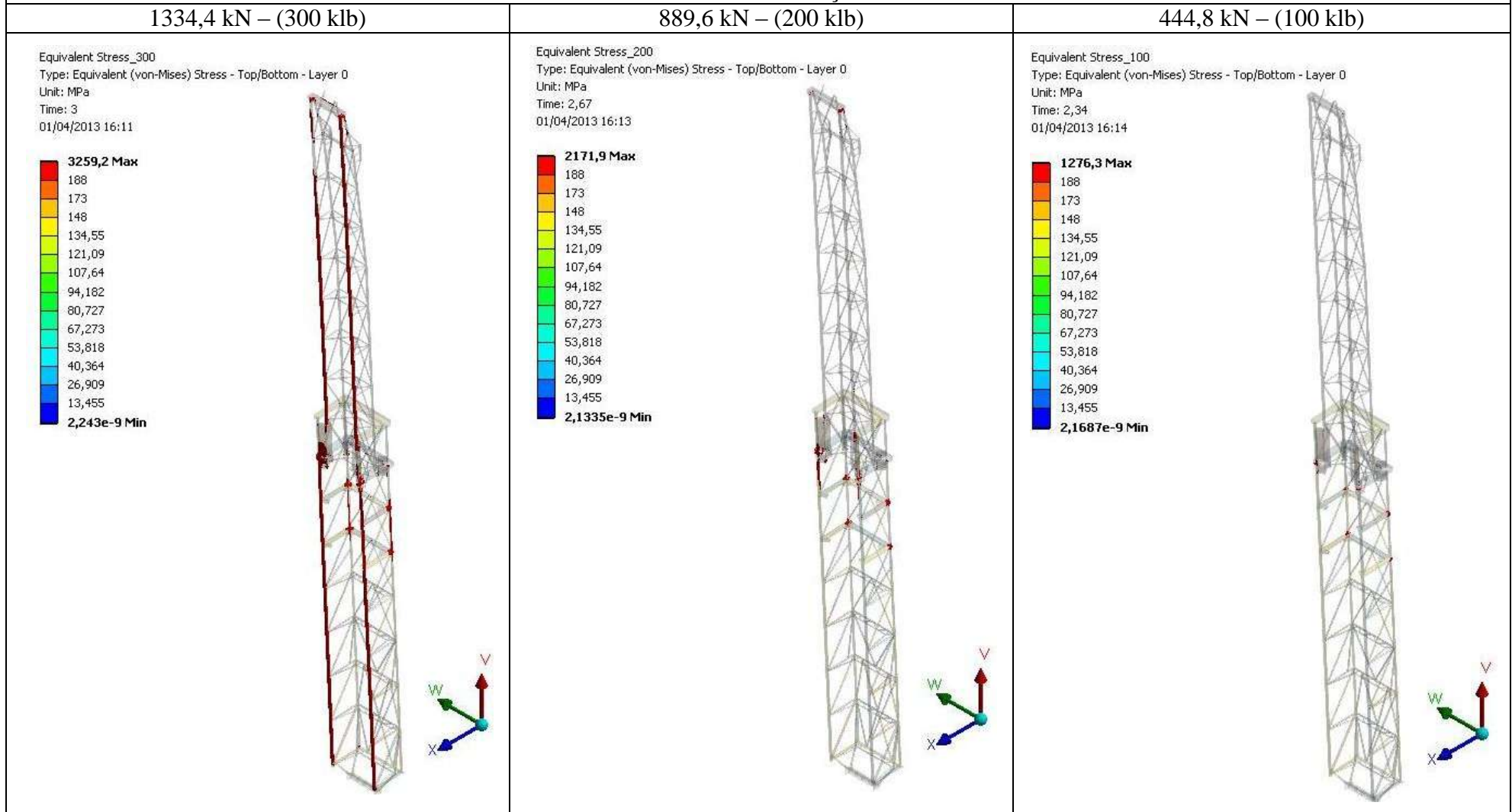


Figura 4.13 – Regiões acima do limite admissível

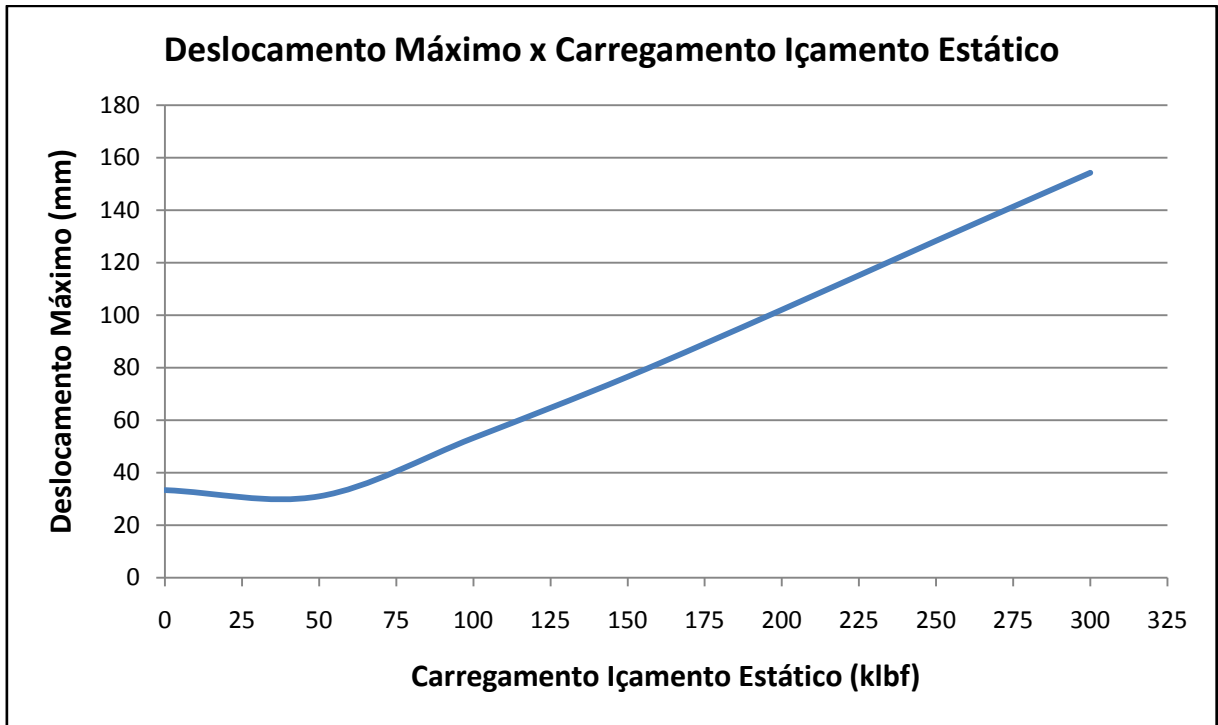


Figura 4.14 – Variação da Deformação x Carregamento de Içamento Estático para Hipótese C

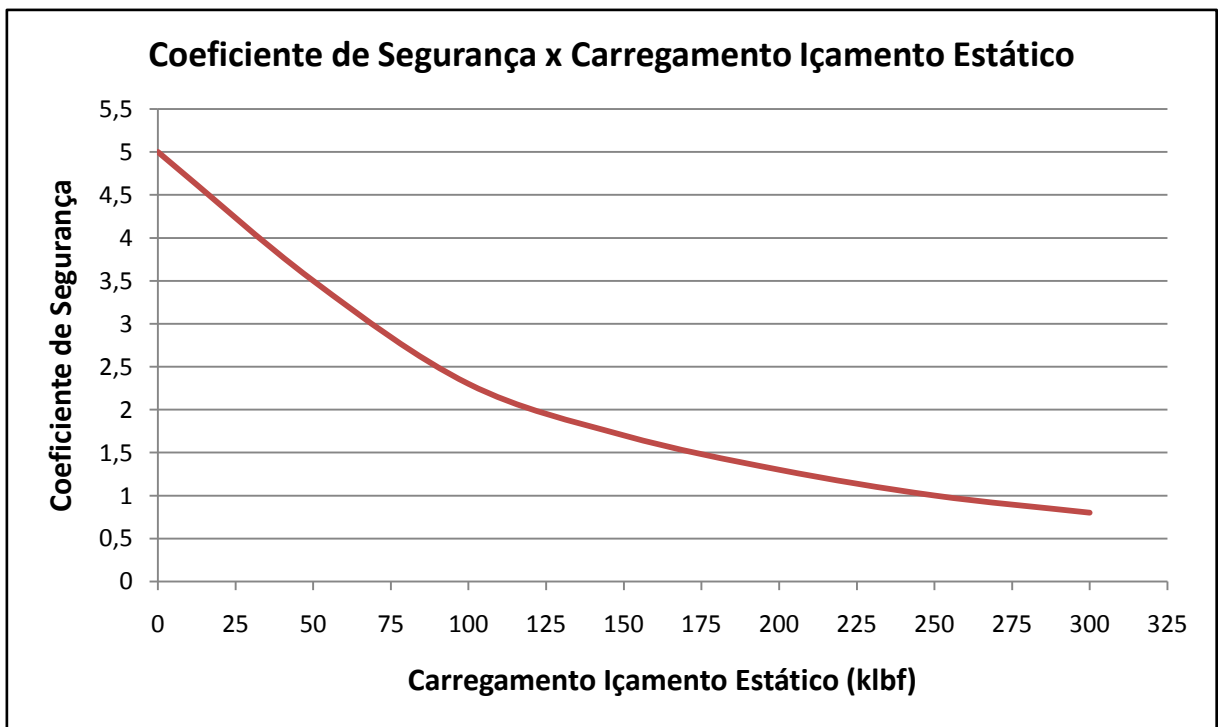


Figura 4.15 – Variação do Coeficiente de Segurança x Carregamento de Içamento Estático para Hipótese C

Conforme ilustrado na Figura 4.15, verifica-se que para valores de carregamento de içamento estático acima de 680,5 kN (153 klbf) as tensões excedem o limite admissível.

Na hipótese C, o modo principal de falha é flambagem e torção das colunas frontais. A falha por torção ocorre devido ação do carregamento de vento ser na direção diagonal (114°), ou seja, direção mais crítica, conforme descrito no APÊNDICE A.

4.4 RESULTADOS PARA CONDIÇÃO DE OPERAÇÃO - HIPÓTESE D

A hipótese D consiste na avaliação da estrutura do mastro da sonda de produção terrestre na condição de operação com a aplicação da ação do vento sobre a estrutura sem tubos estaleirados, conforme descrito na Tabela 3.2.

Na Figura 4.16, Figura 4.17 e Figura 4.18, são apresentados os gráficos de deslocamento máximo, tensões equivalentes e regiões que excedem o limite admissível de tensões, respectivamente.

Os gráficos de variação do deslocamento e variação do coeficiente de segurança em função da variação do carregamento de içamento estático são ilustrados na Figura 4.19 e Figura 4.20, respectivamente.

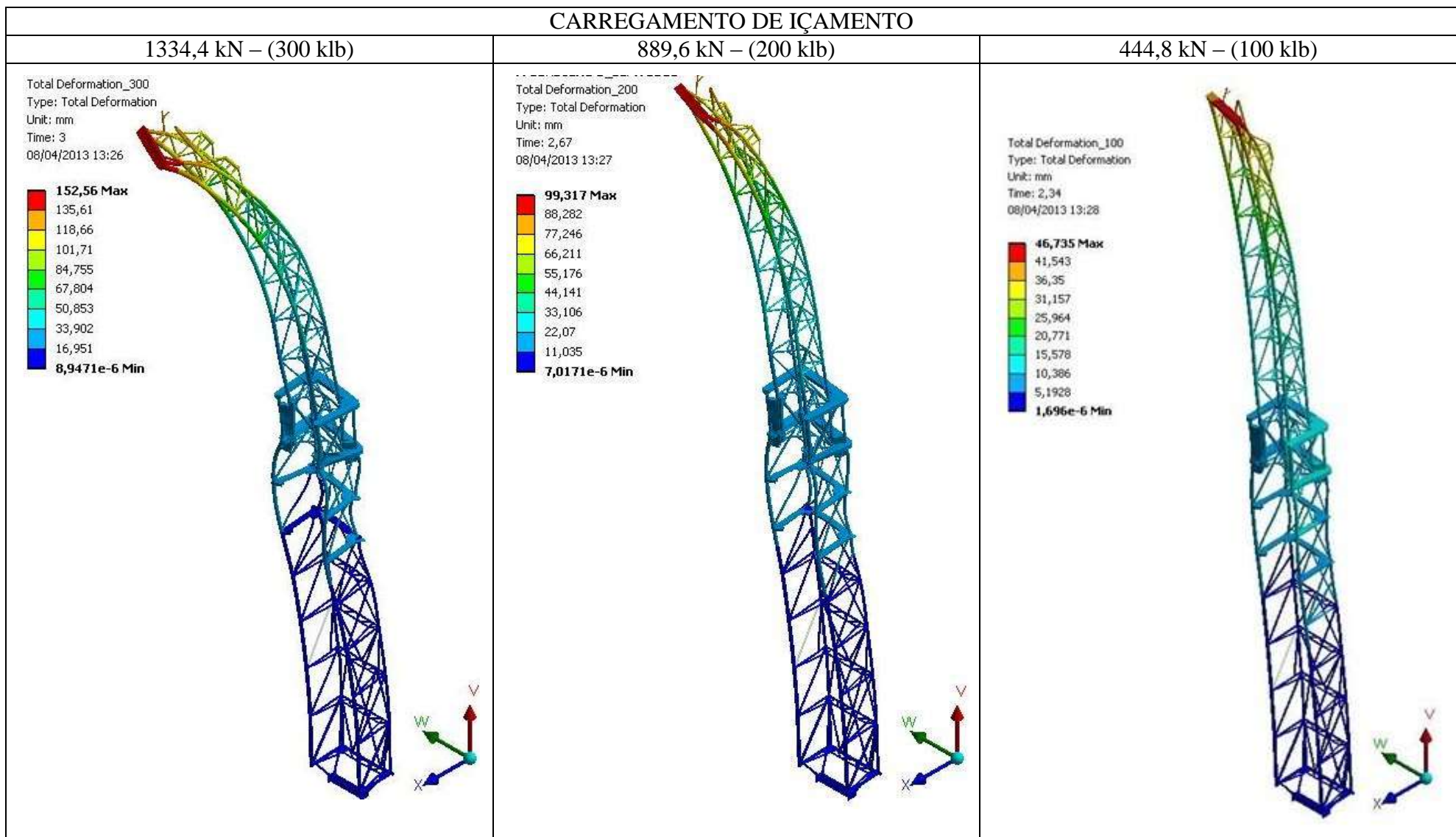


Figura 4.16 – Deformação total da estrutura (escala de deformação: 50x)

CARREGAMENTO DE IÇAMENTO

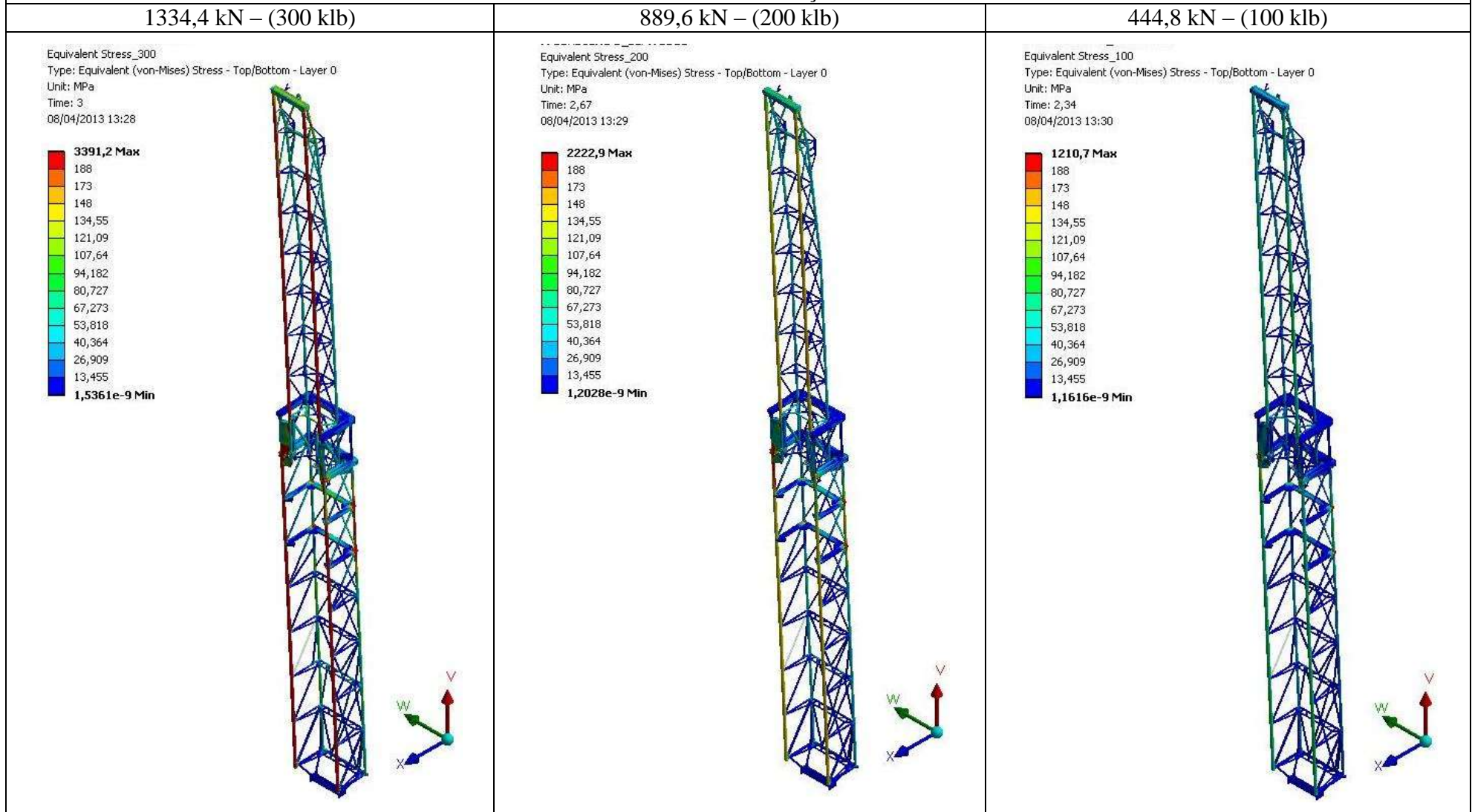


Figura 4.17 – Deformação total da estrutura (escala de deformação: 50x)

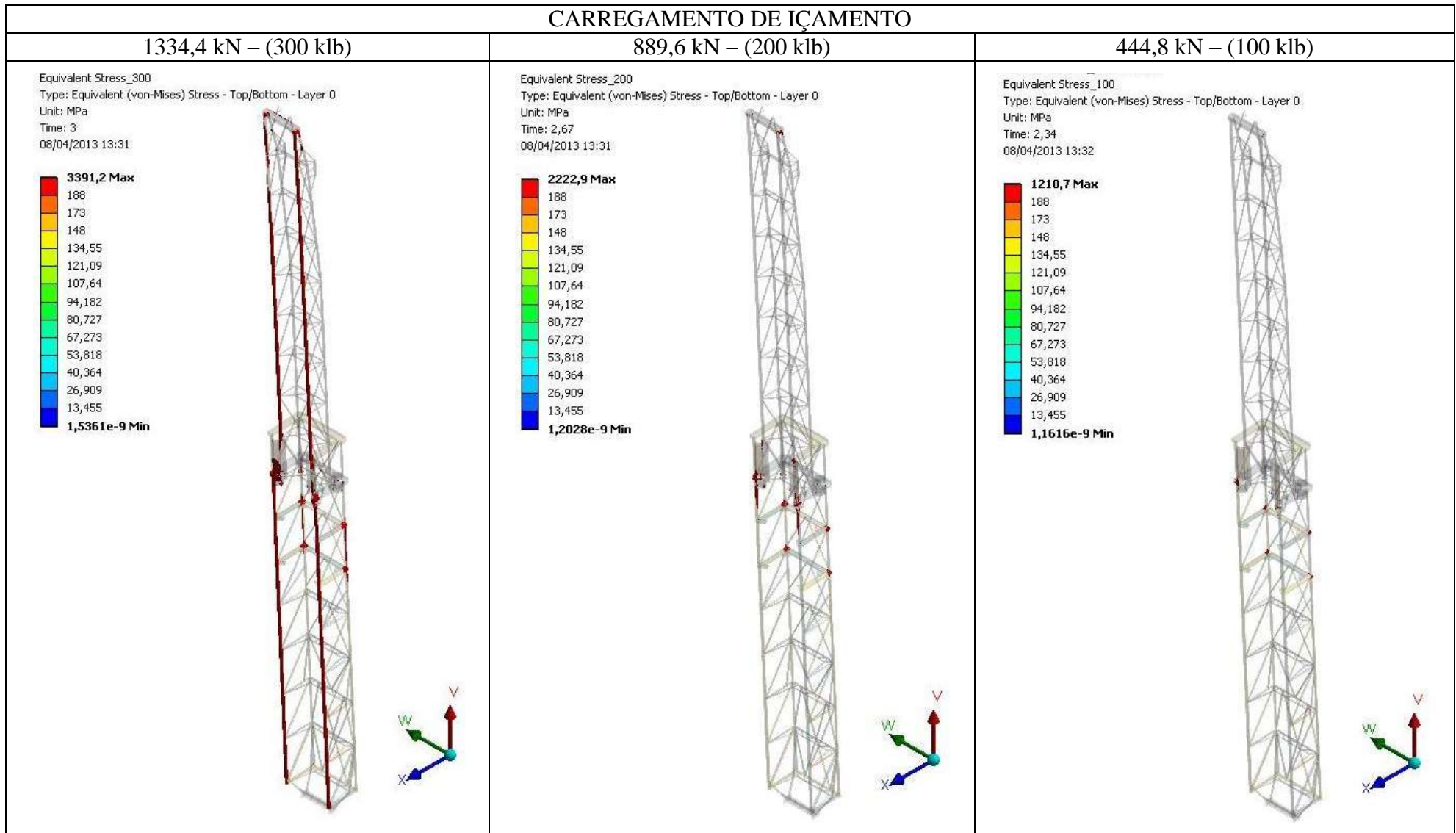


Figura 4.18 – Regiões acima do limite admissível

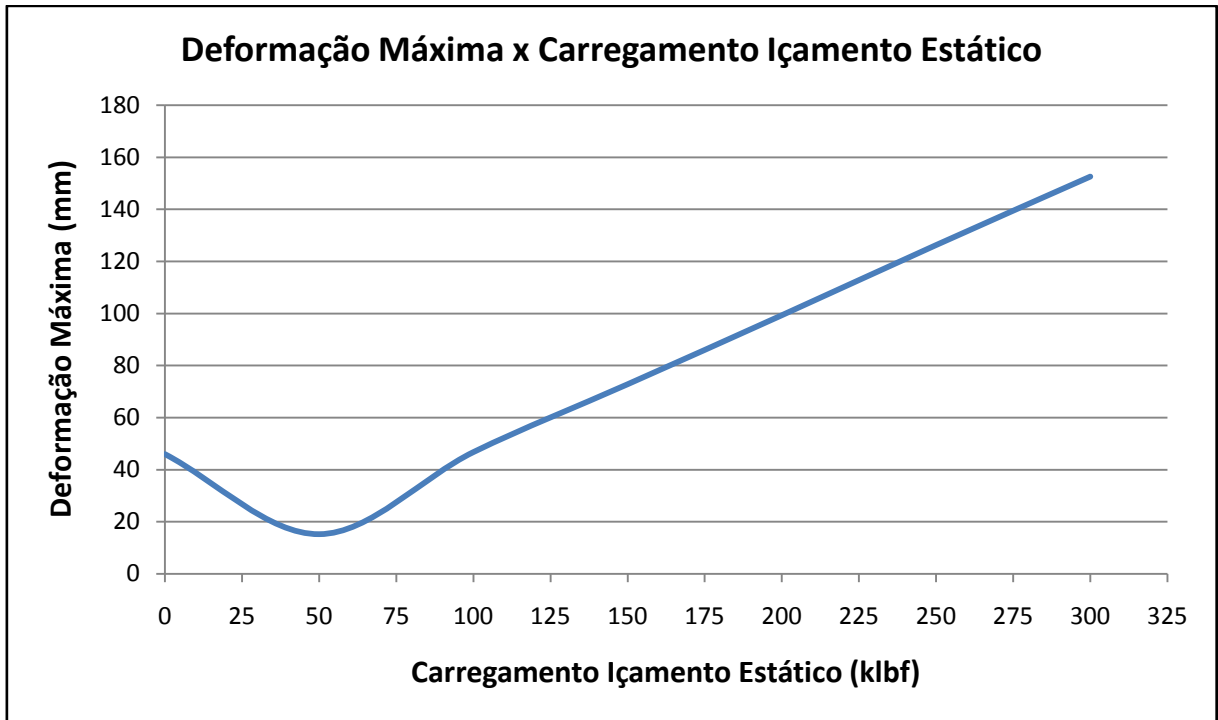


Figura 4.19 – Variação da Deformação x Carregamento de Içamento Estático para Hipótese D

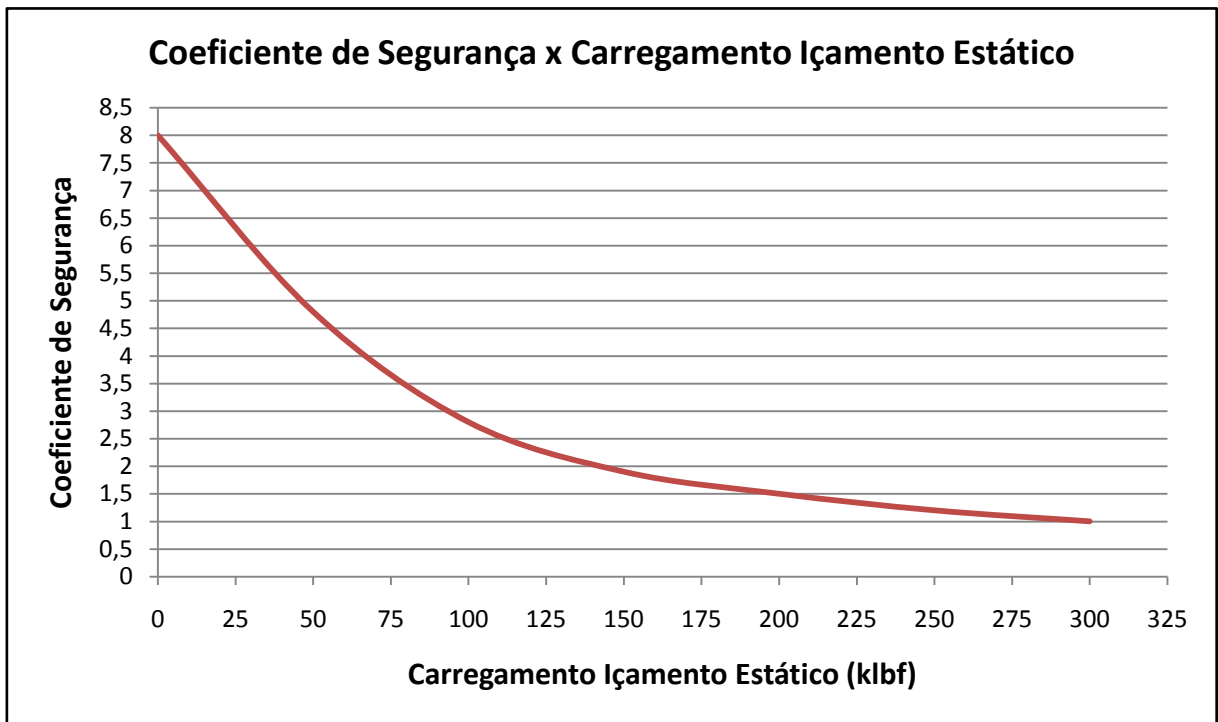


Figura 4.20 – Variação do Coeficiente de Segurança x Carregamento de Içamento Estático para Hipótese D

Conforme ilustrado na Figura 4.20, verifica-se que para valores de carregamento de içamento estático acima de 778,4 kN (175 klbf) as tensões excedem o limite admissível.

Na hipótese D, o modo principal de falha da estrutura é devido à flambagem das colunas frontais. A ação do carregamento do vento agindo na diagonal (114°) gera torção, porém o esforço de torção é minimizado quando a estrutura está sem os tubos estaleirados, conforme descrito no APÊNDICE A.

4.5 RESULTADOS PARA CONDIÇÃO ESPERADA DE VENTO – HIPÓTESE E

A hipótese E consiste na avaliação da estrutura do mastro da sonda de produção terrestre para a condição esperada de ação do vento, conforme descrito na Tabela 3.2.

Na Figura 4.21, Figura 4.22 e Figura 4.23, são apresentados os gráficos de deslocamento máximo, tensões equivalentes e regiões que excedem o limite admissível de tensões, respectivamente.

Os gráficos de variação do deslocamento e variação do coeficiente de segurança em função da variação do carregamento de içamento estático são ilustrados na Figura 4.24 e Figura 4.25, respectivamente.

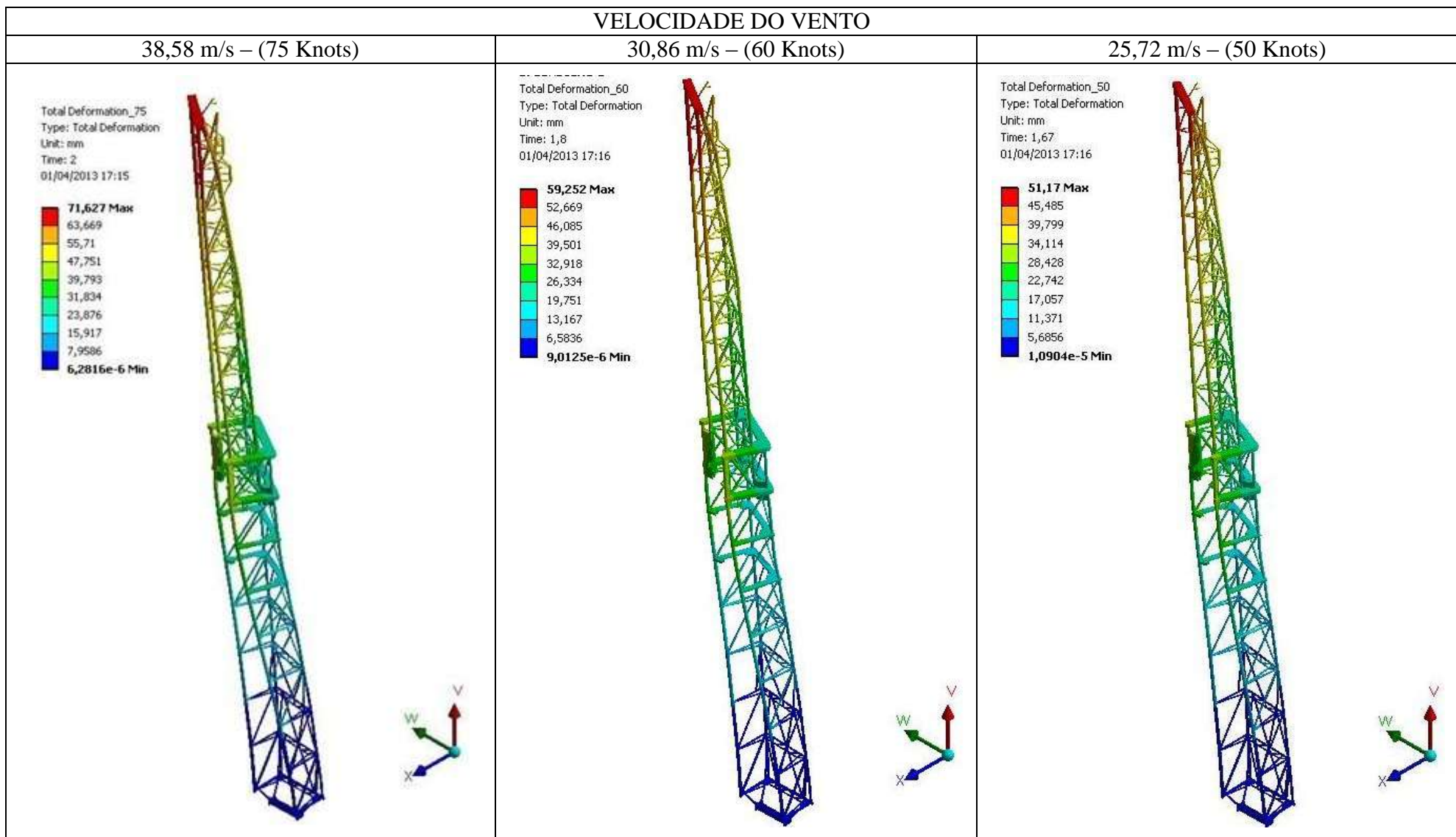


Figura 4.21 – Deformação total da estrutura (escala de deformação: 50x)

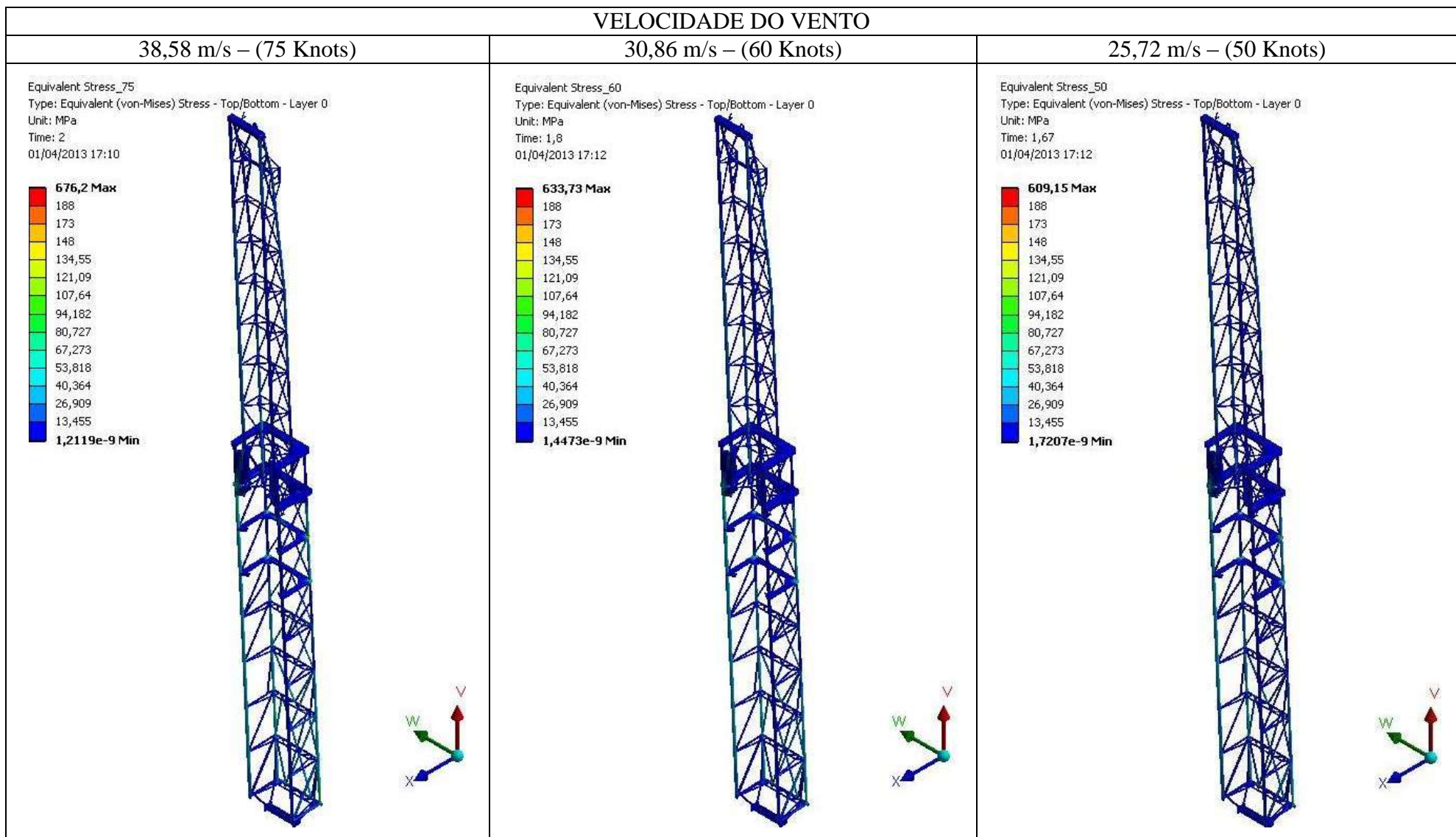


Figura 4.22 – Gradiente de tensões na estrutura do mastro

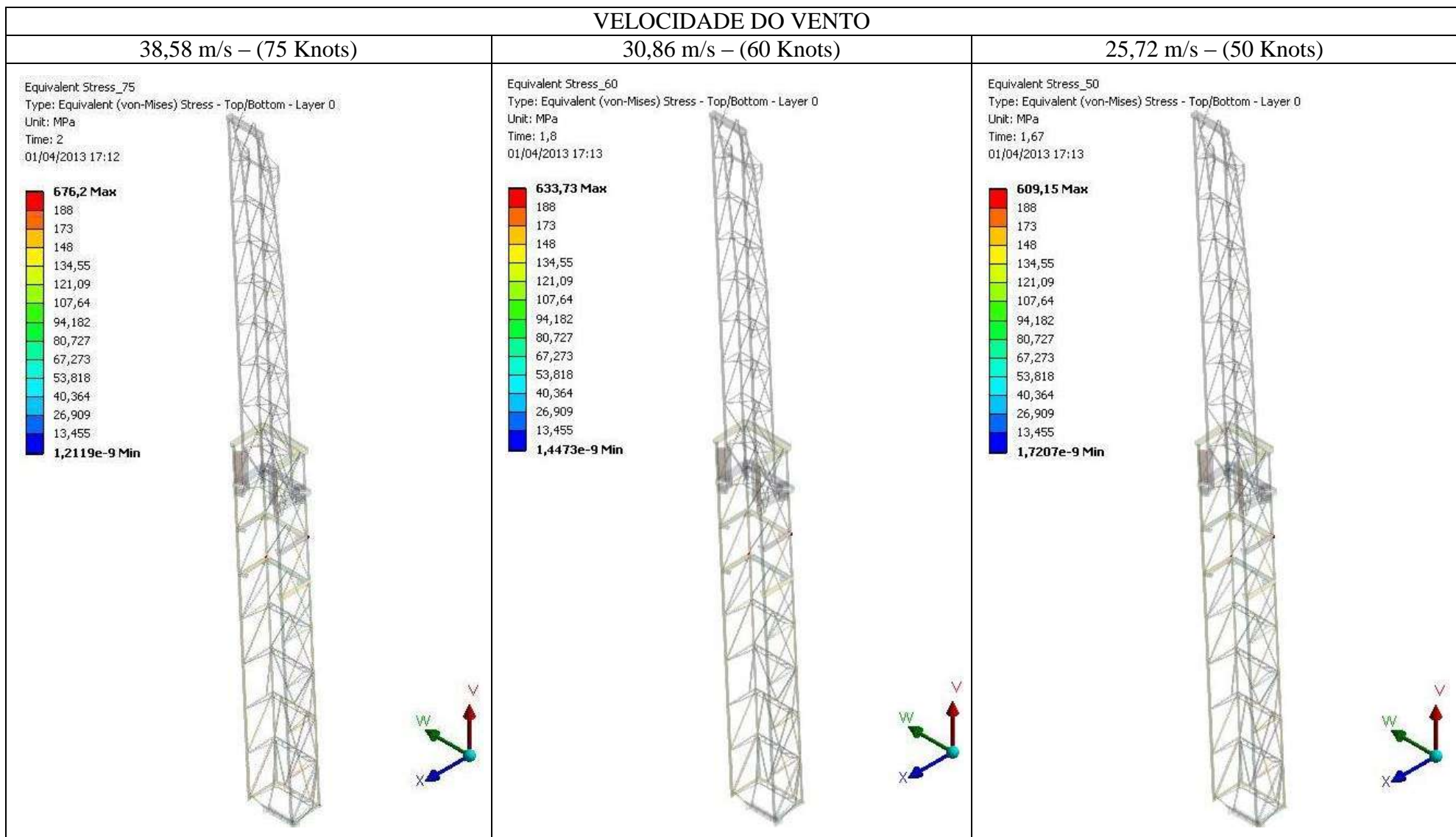


Figura 4.23 – Regiões acima do limite admissível

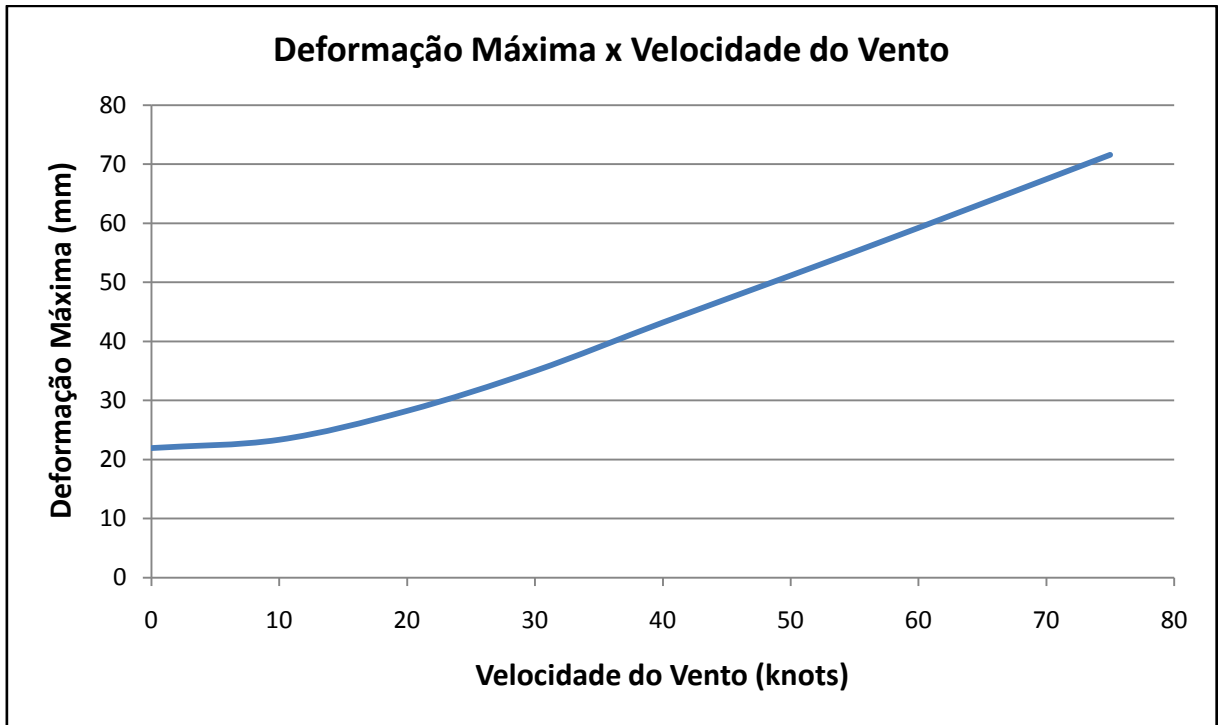


Figura 4.24 – Variação da Deformação x Carregamento de Içamento Estático para Hipótese E

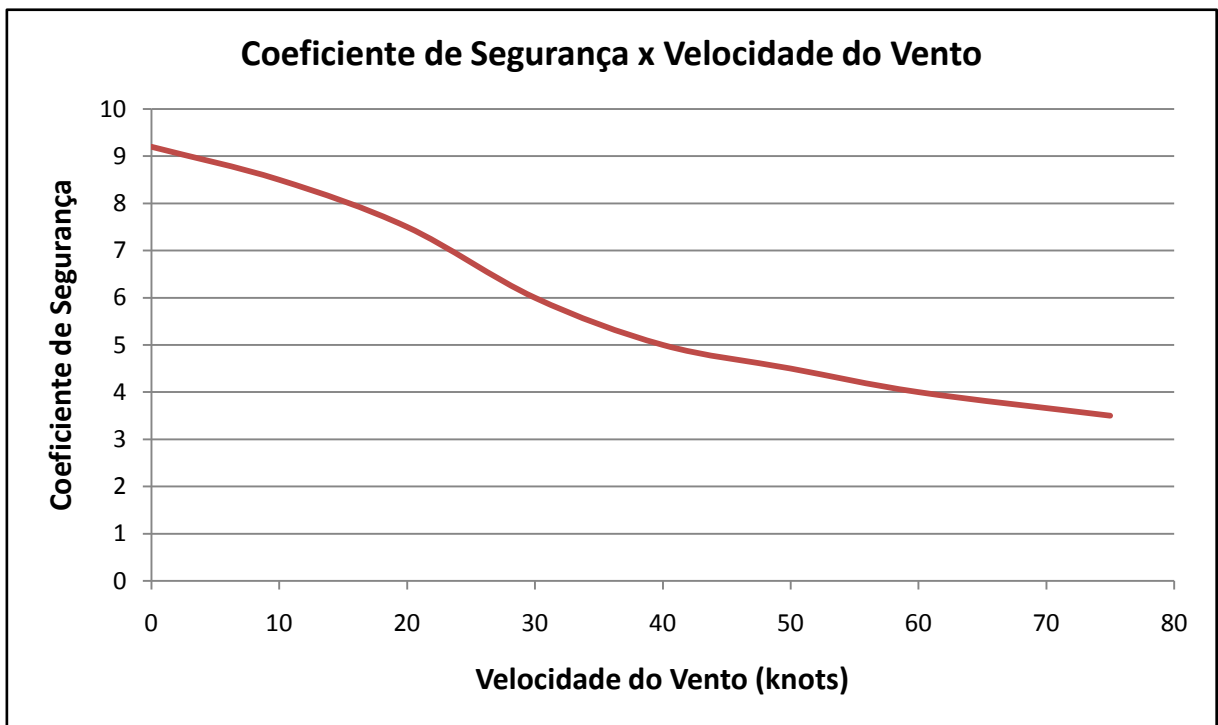


Figura 4.25 – Variação do Coeficiente de Segurança x Carregamento de Içamento Estático para Hipótese E

Conforme ilustrado na Figura 4.25, verifica-se que para valores de carregamento de içamento estático acima de 45,6 m/s (88,7 Knots) as tensões excedem o limite admissível.

Na hipótese E, o modo principal de falha é devido à torção da estrutura.

A falha por torção ocorre devido ação do carregamento de vento ser na direção diagonal (114°), ou seja, direção mais crítica, conforme descrito no APÊNDICE A.

4.6 RESULTADOS PARA CONDIÇÃO ESPERADA DE VENTO - HIPÓTESE F

A hipótese F consiste na avaliação da estrutura do mastro da sonda de produção terrestre para a condição inesperada de ação do vento, conforme descrito na Tabela 3.2.

Na Figura 4.26, Figura 4.27 e Figura 4.28, são apresentados os gráficos de deslocamento máximo, tensões equivalentes e regiões que excedem o limite admissível de tensões, respectivamente.

Os gráficos de variação do deslocamento e variação do coeficiente de segurança em função da variação do carregamento de içamento estático são ilustrados na Figura 4.29 e Figura 4.30, respectivamente.

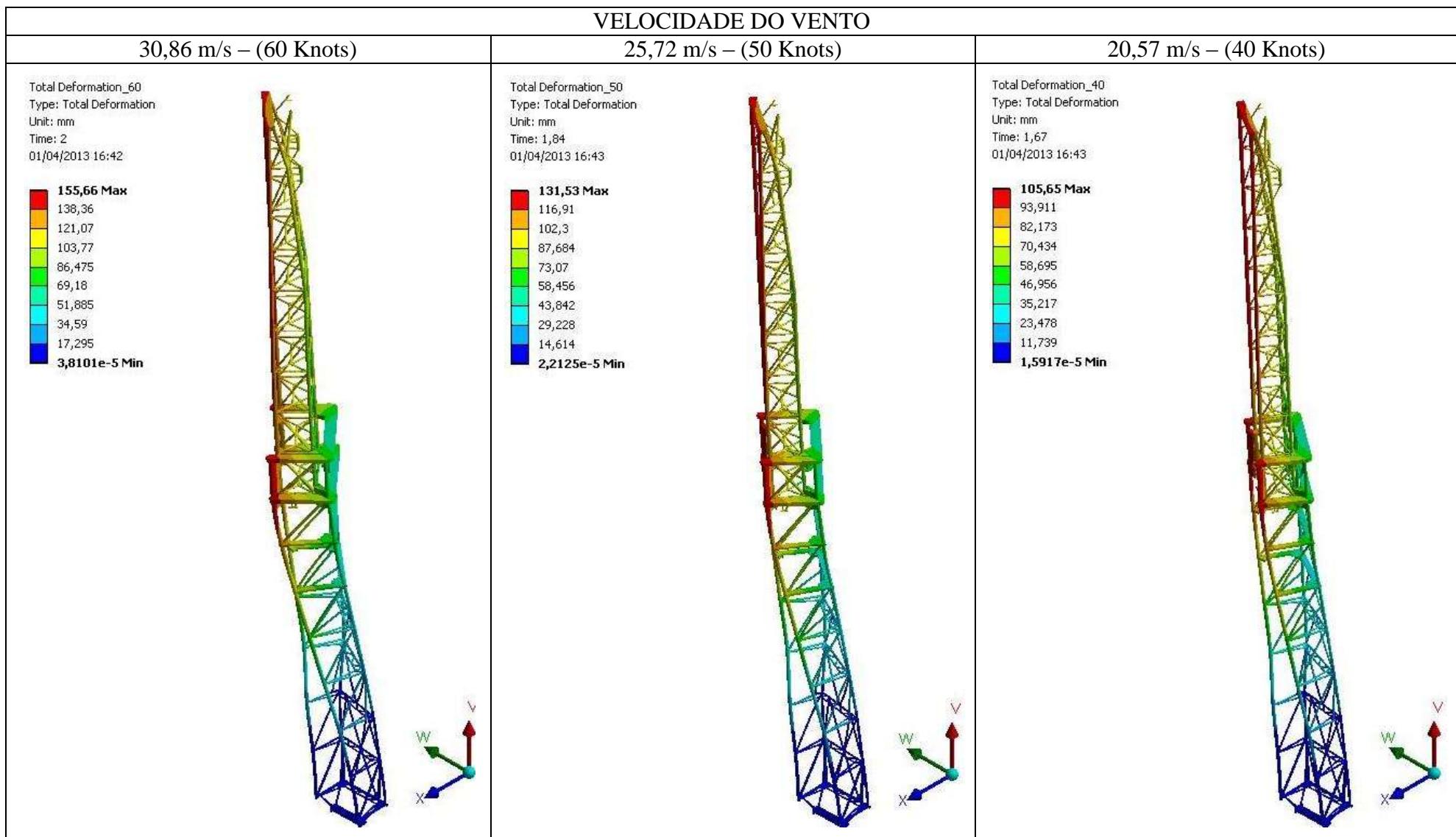


Figura 4.26 – Deslocamento total da estrutura (escala de deformação: 20x)

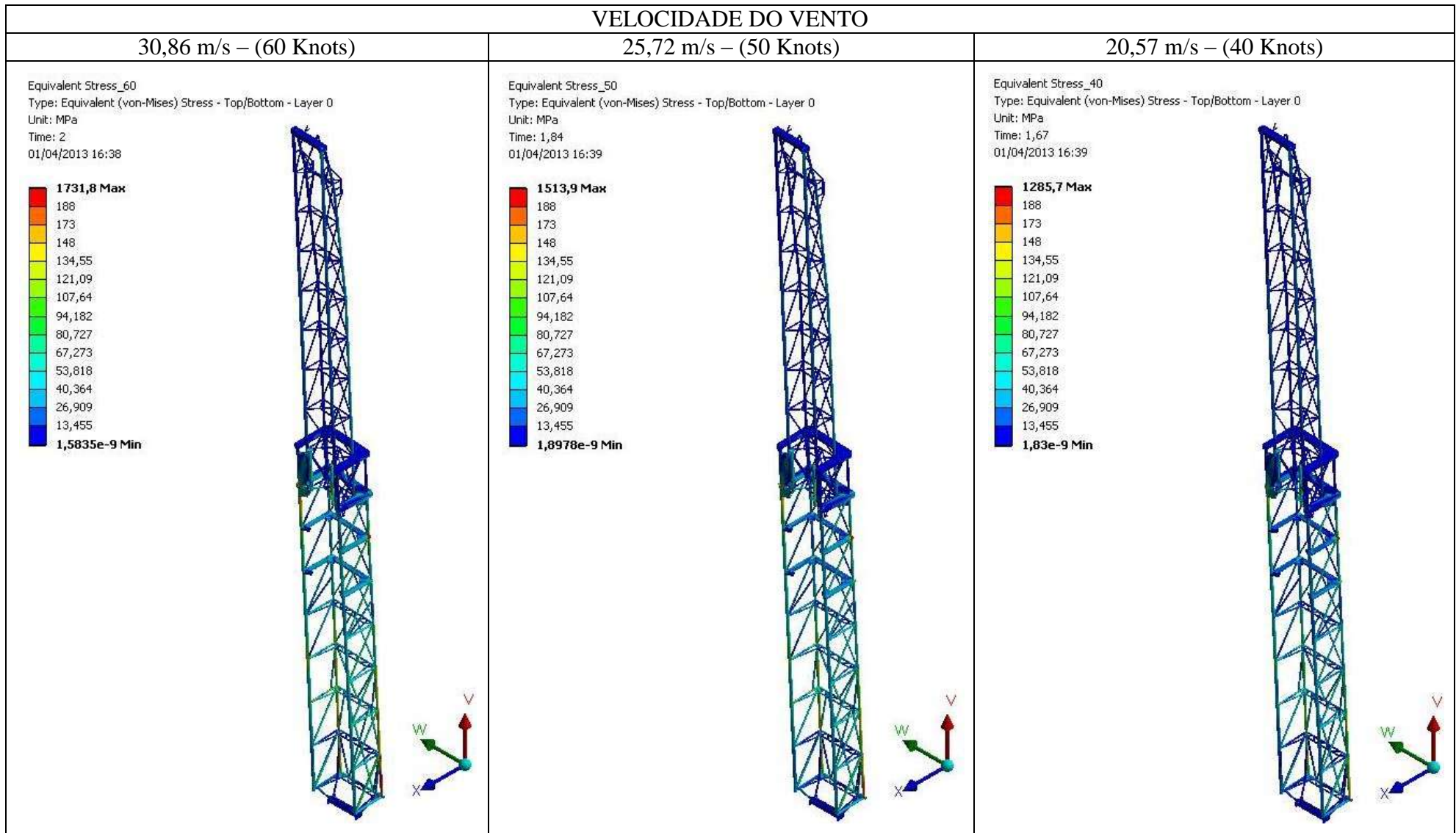


Figura 4.27 – Gradiente de tensões na estrutura do mastro

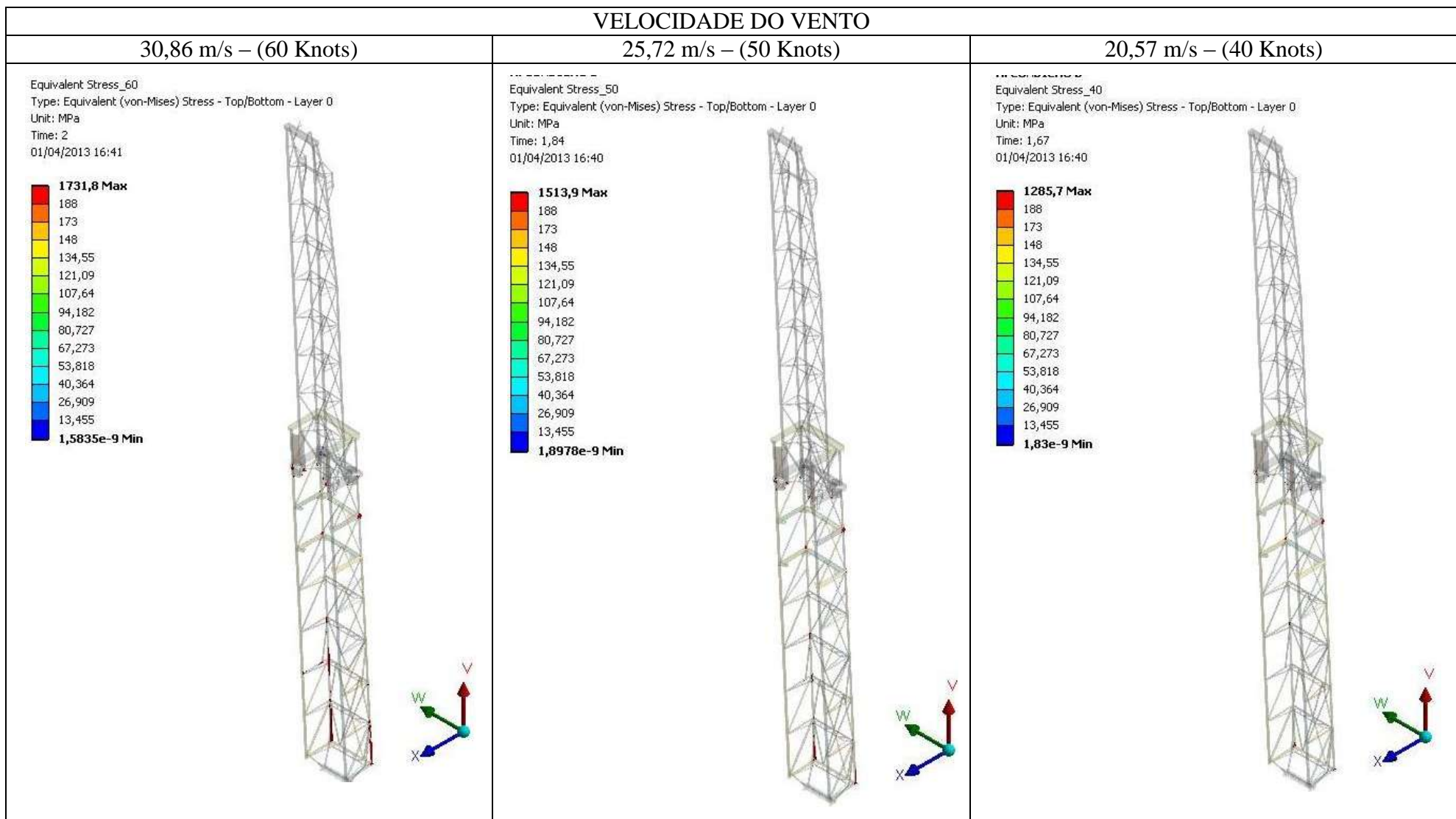


Figura 4.28 – Regiões acima do limite admissível

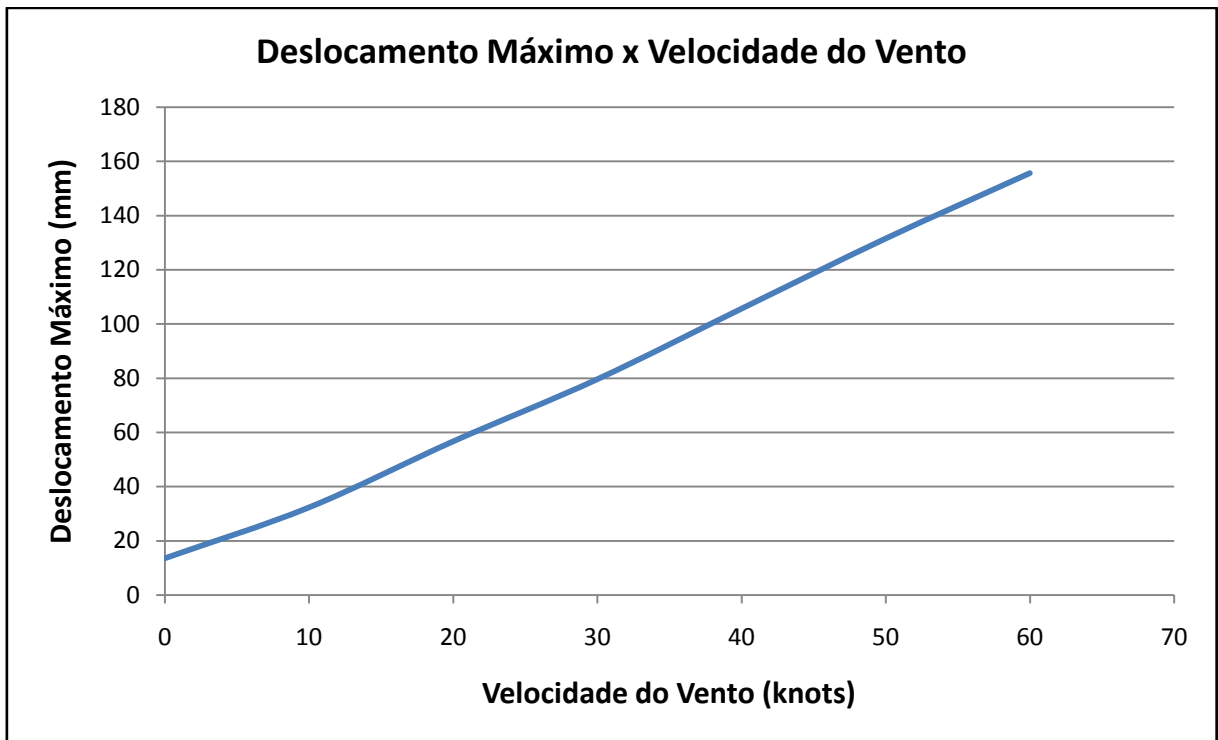


Figura 4.29 – Variação da Deformação x Carregamento Içamento Estático para Hipótese F

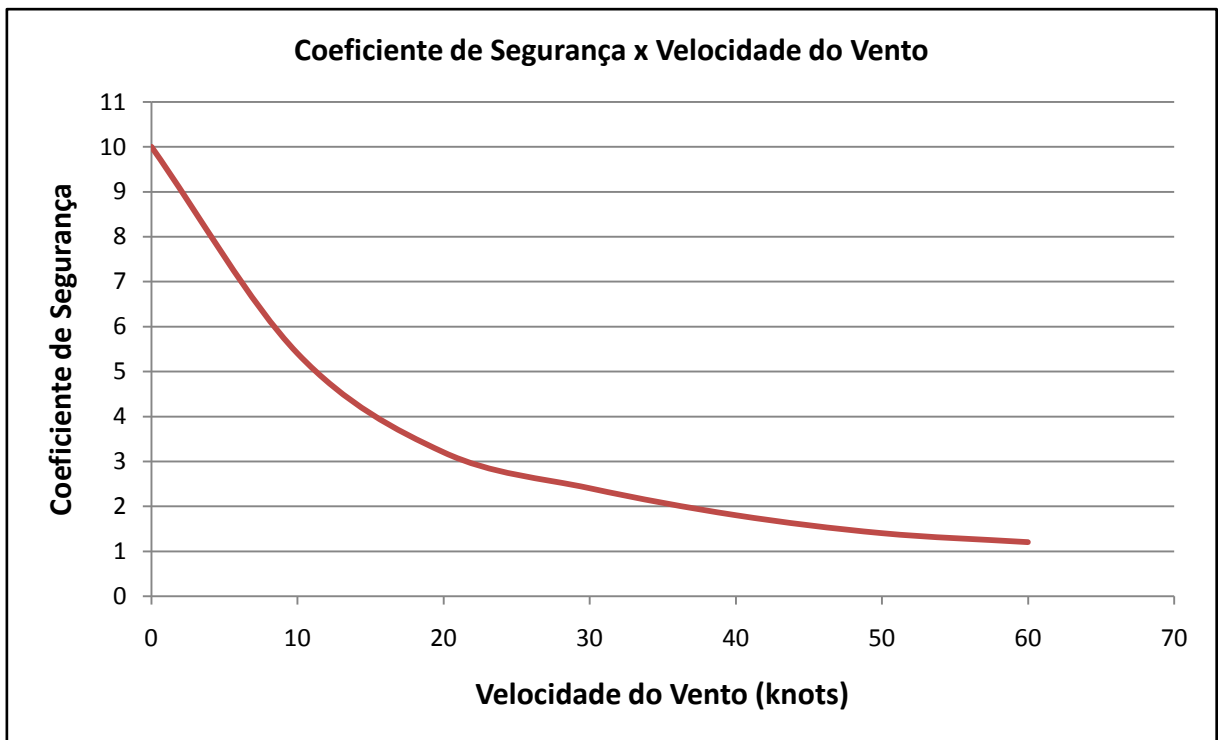


Figura 4.30 – Variação do Coeficiente de Segurança x Carregamento Içamento Estático para Hipótese F

Conforme ilustrado na Figura 4.30, verifica-se que para valores de carregamento de içamento estático acima de 21,8 m/s (42,4 Knots) as tensões excedem o limite admissível.

Na hipótese F, o modo principal de falha é devido à torção da estrutura.

A falha por torção ocorre devido ação do carregamento de vento ser na direção diagonal (114°), ou seja, direção mais crítica, conforme descrito no APÊNDICE A.

4.7 RESUMO DOS RESULTADOS

Nas seções a seguir são ilustrados os resultados do estudo comparativo das várias condições de combinação de carregamento analisadas neste trabalho.

4.7.1 Análise Comparativa para a condição de operação – Hipóteses A, B, C e D.

No gráfico da Figura 4.31, são ilustrados os resultados do estudo comparativo da variação do deslocamento máximo em função da variação do carregamento de içamento estático entre as hipóteses A, B, C e D, na condição de operação, conforme descrito na Tabela 3.2 e Tabela 3.3.

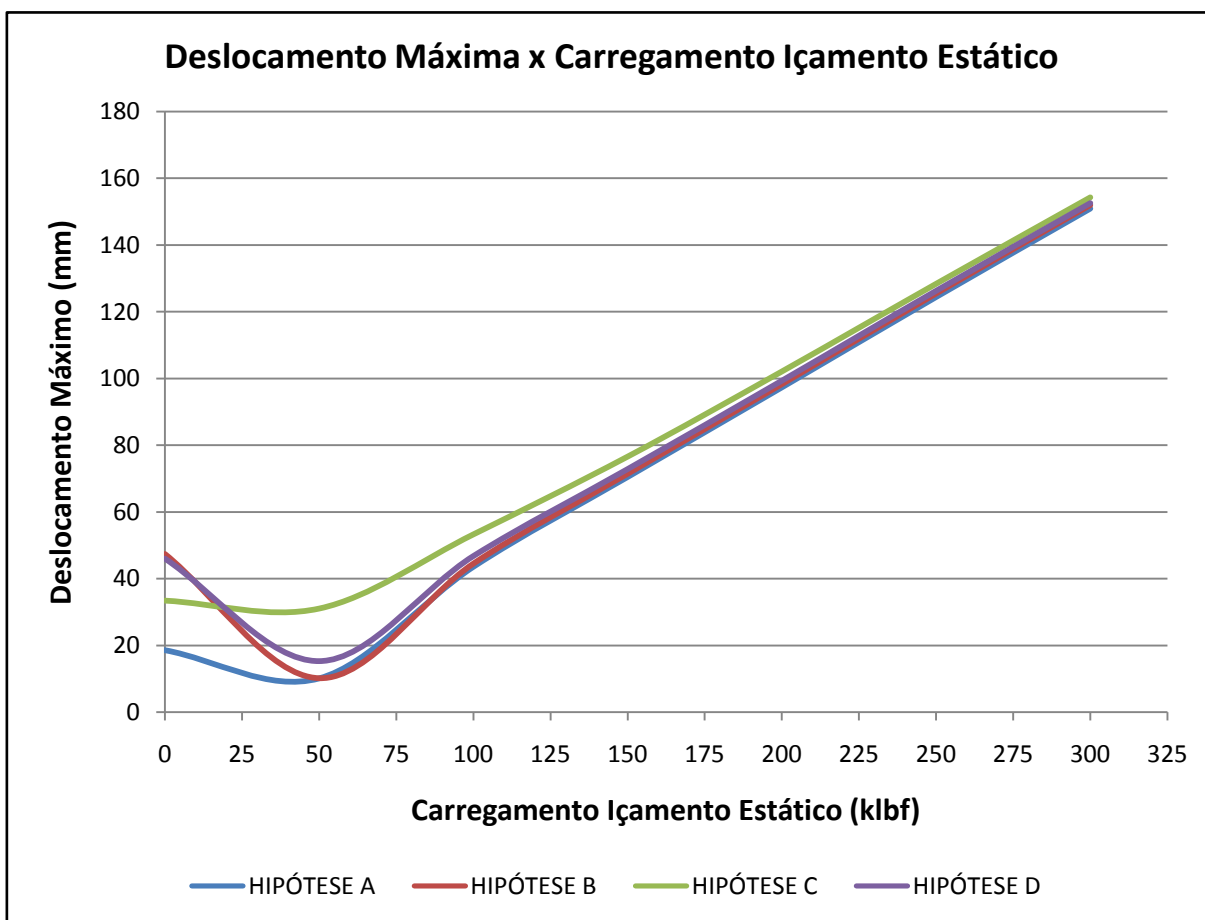


Figura 4.31 – Variação da deformação máxima entre as hipóteses A, B, C e D

Conforme ilustrado no gráfico da Figura 4.31, verifica-se que não ocorreu uma diferença significativa nos valores de deslocamento do mastro para as condições A, B, C e D. O gráfico da Figura 4.31, apresentou uma inflexão no deslocamento do mastro para valores de carregamento de içamento estático entre 0 kN (0 klbf) e 222,4 kN (50 Klbf), esta inflexão é explicada no APÊNDICE F.

No gráfico da Figura 4.32, são ilustrados os resultados do estudo comparativo da variação do coeficiente de segurança em função da variação do carregamento de içamento estático entre as hipóteses A, B, C e D, na condição de operação, conforme descrito na Tabela 3.2 e Tabela 3.3.

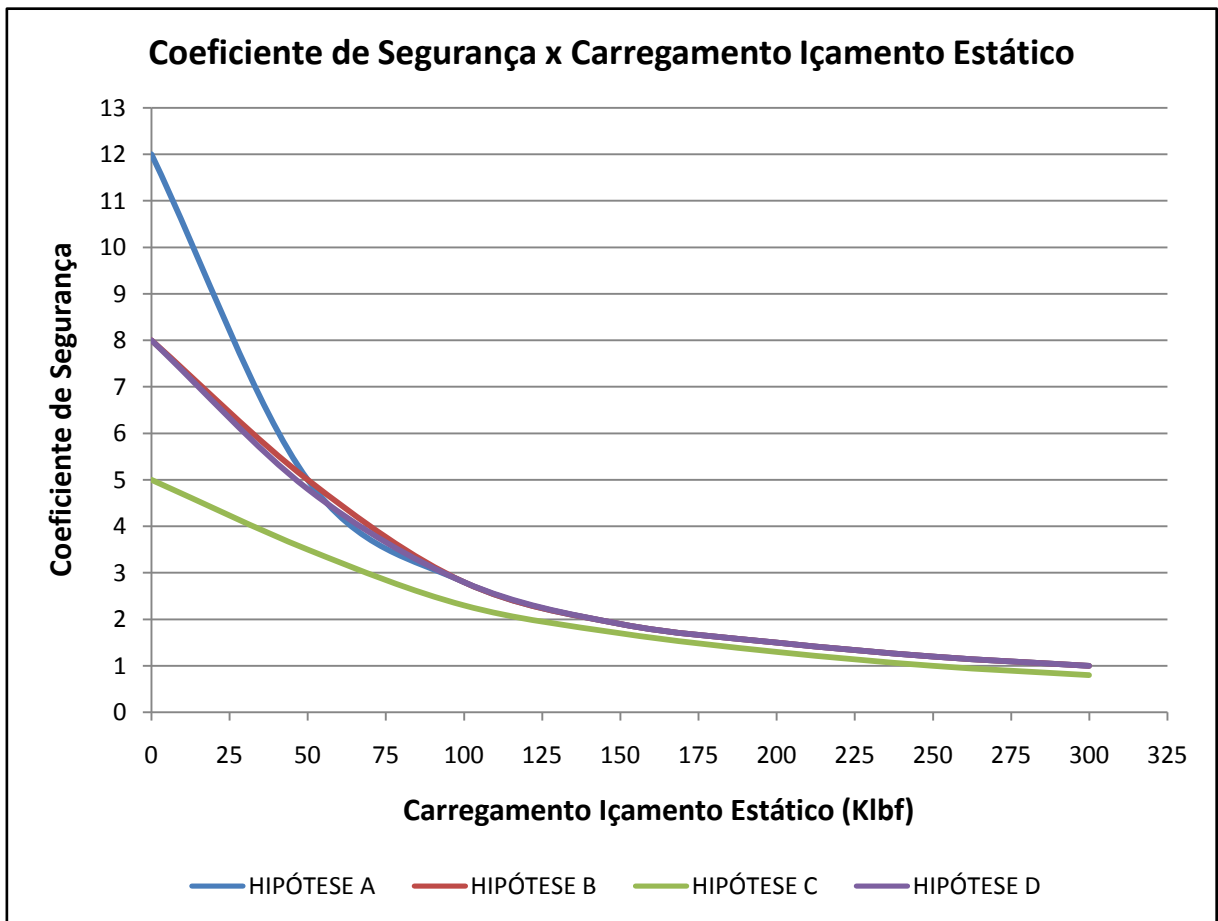


Figura 4.32 – Variação do coeficiente de segurança entre as hipóteses A, B, C e D

Conforme ilustrado no gráfico da Figura 4.32, verifica-se que a estrutura sem tubos estaleirados (Hipótese A) suporta um carregamento de içamento estático 1,1% maior em relação à estrutura com tubos estaleirados (Hipótese B), quando não há ação do carregamento de vento atuando sobre a estrutura.

Entretanto, sob a ação do carregamento do vento, verifica-se que a estrutura sem tubos estaleirados suporta uma carga de içamento estático de aproximadamente 14,3% maior em relação à estrutura com tubos estaleirados.

4.7.2 Valores limites de carregamentos combinados

No gráfico da Figura 4.33, são ilustrados os valores limites de carregamentos simples e combinados que a estrutura pode ser submetida, na condição de operação, quando a mesma estiver com tubos estaleirados.

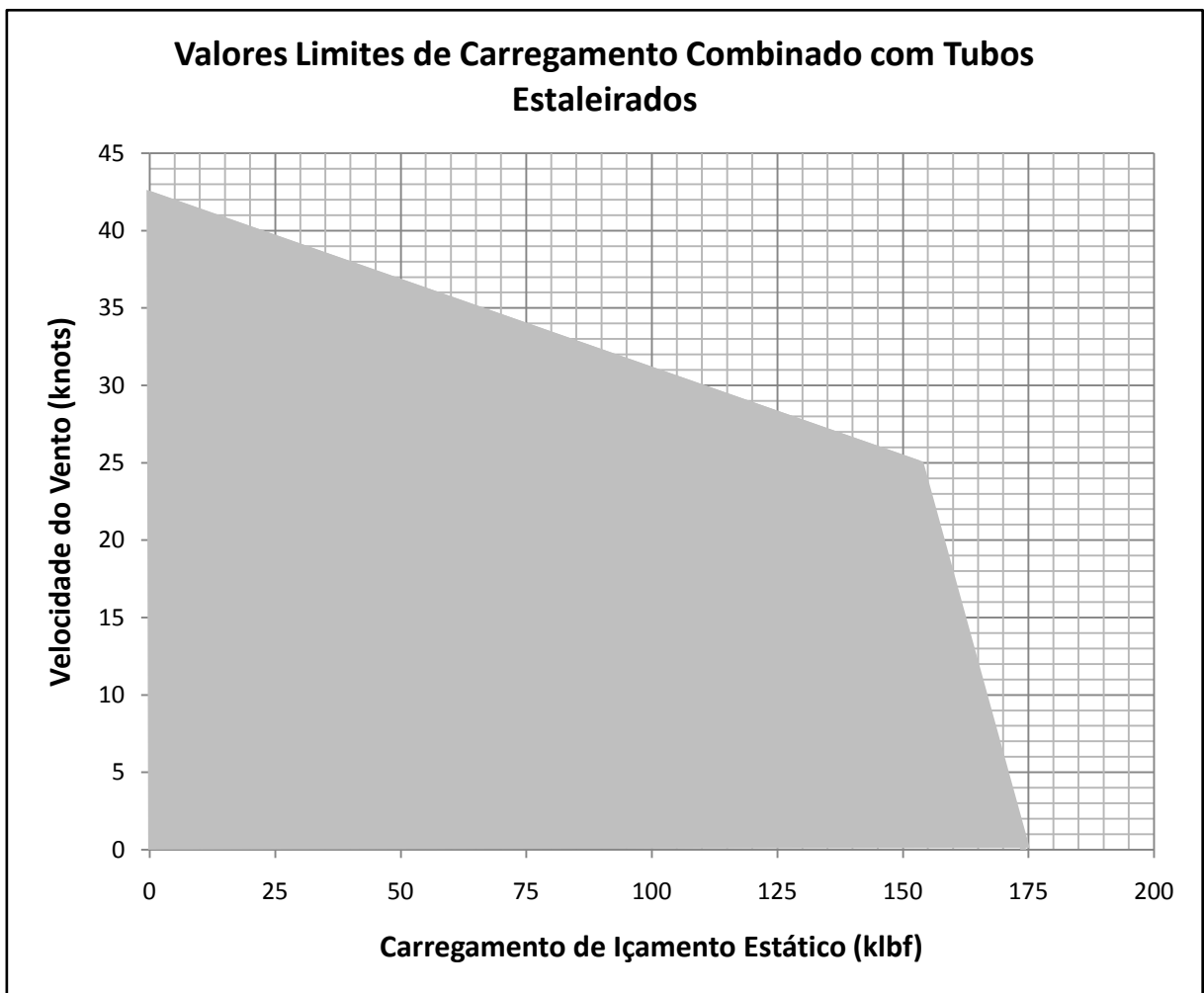


Figura 4.33 - Valores limites de carregamentos combinados na condição de operação com tubos estaleirados

Conforme ilustrado no gráfico da Figura 4.33, verifica-se que para atender o coeficiente de segurança de 1,67 especificado pela norma API Spec 4F, o valor máximo de carregamento de içamento estático que a estrutura pode ser submetida quando a mesma está

com tubos estaleirados é de aproximadamente 773,9 kN (174 klbf) para vento de 0 m/s (0 Knots) e 680,5 kN (153 klbf) para vento de 12,86 m/s (25 Knots). Sem carregamento de içamento estático e com tubos estaleirados, a máxima velocidade de vento que a estrutura pode ser submetida é de aproximadamente 21,8 m/s (42,7 Knots).

No gráfico da Figura 4.34, são ilustrados os valores limites de carregamentos simples e combinados que a estrutura pode ser submetida, na condição de operação, quando a mesma estiver sem tubos estaleirados.

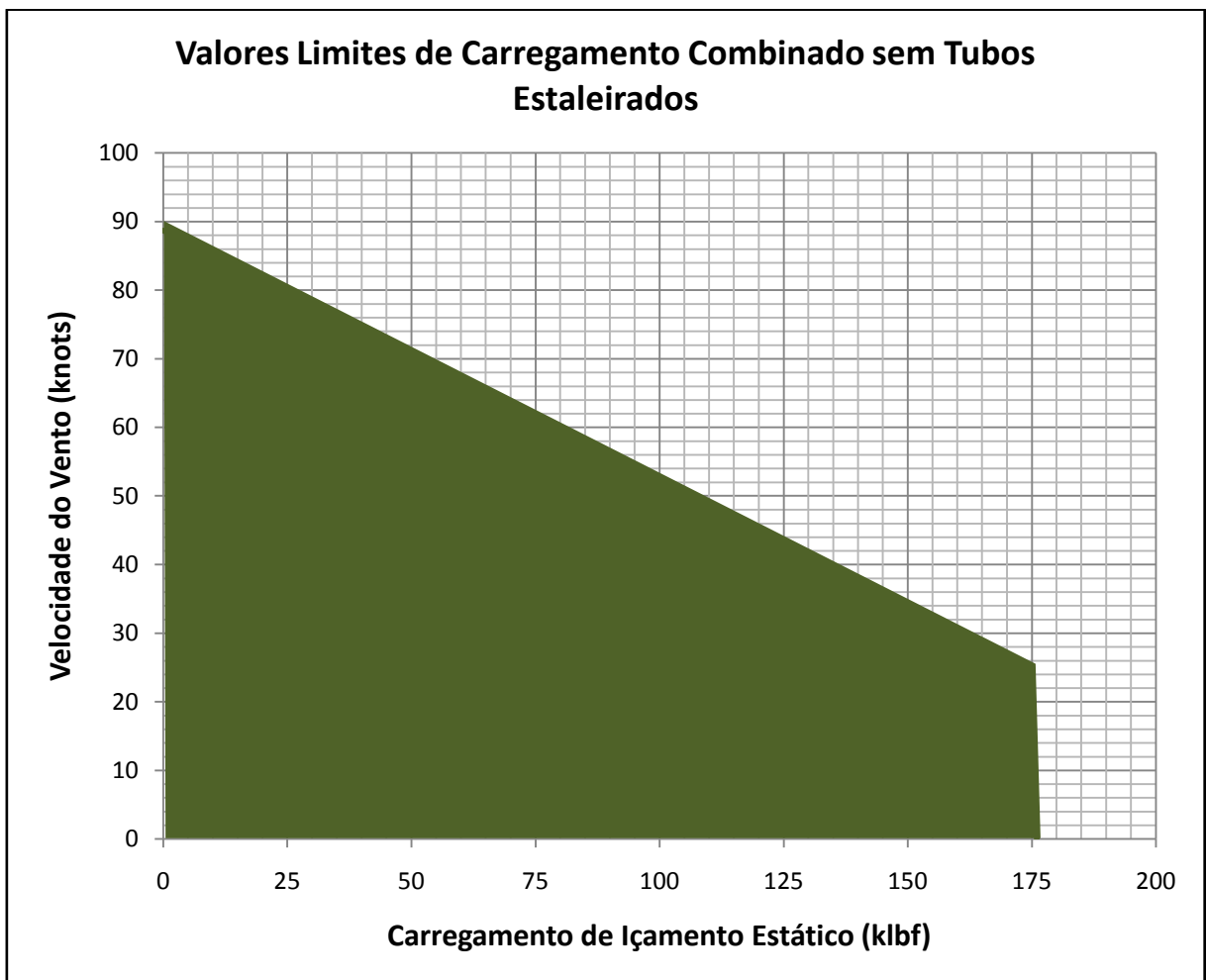


Figura 4.34 – Valores limites de carregamentos combinados na condição de operação sem tubos estaleirados

Conforme ilustrado nos gráficos da Figura 4.34, verifica-se que para atender o coeficiente de segurança de 1,67 especificado pela norma API Spec 4F, o máximo valor de carregamento de içamento estático que a estrutura pode ser submetida quando a mesma está sem tubos estaleirados é de aproximadamente 782,8 kN (176 klbf) para vento de 0 m/s (0 Knots) e 778,7 kN (175 klbf) para vento de 12,86 m/s (25 Knots).

Sem carregamento de içamento estático e sem tubos estaleirados, a máxima velocidade de vento que a estrutura pode ser submetida é de aproximadamente 45,6 m/s (88,7 Knots).

No gráfico da Figura 4.35, é apresentada uma análise comparativa dos valores limites de carregamentos simples e combinados entre a estrutura com tubos estaleirados e a estrutura sem tubos estaleirados, na condição de operação.

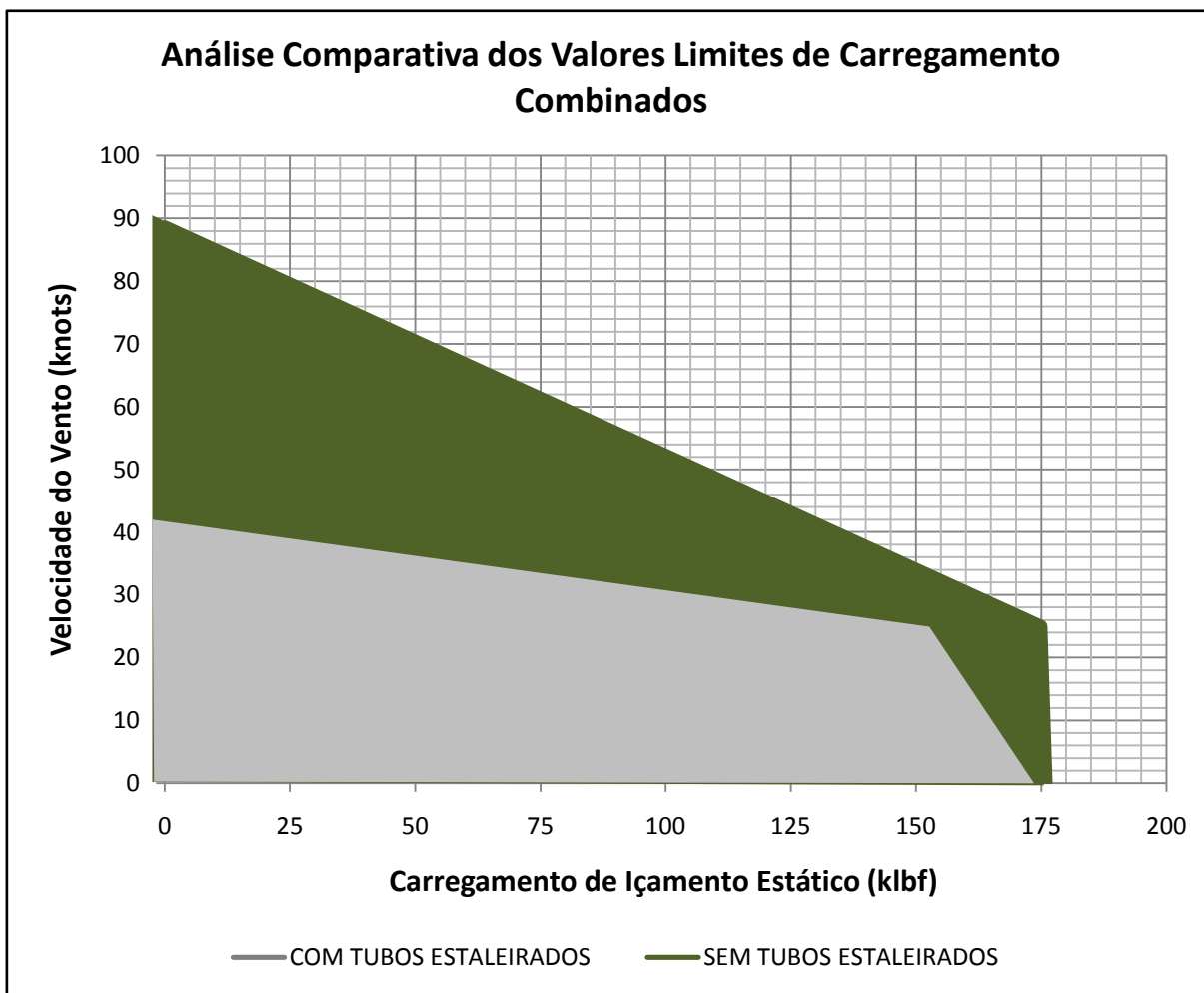


Figura 4.35 – Análise comparativa dos valores limites de carregamentos combinados entre condição de operação com tubos estaleirados e sem tubos estaleirados

Conforme ilustrado o gráfico da Figura 4.35, verifica-se condição de vento de 0 m/s (0 Knots) o máximo carregamento de içamento estático que o mastro com tubos estaleirados pode ser submetido é aproximadamente 1% menor em relação ao mastro sem tubos estaleirados.

Para a condição de vento de 12,86 m/s (25 Knots) o máximo carregamento de içamento estático que o mastro com tubos estaleirados pode ser submetido é aproximadamente 12,5% menor em relação ao mastro sem tubos estaleirados.

O decréscimo do valor de carregamento de içamento estático que o mastro com tubos estaleirados pode ser submetido é devido à carga adicional de 8591,08 N (1931,35 lbf) na direção diagonal (114°) na velocidade de vento 12,86 m/s (25 Knots) gerada pela ação do vento sobre os tubos estaleirados que estão apoiados sobre a mesa do torrasta, conforme descrito no APÊNDICE A.

A ação do vento gera uma falha adicional devido à torção do mastro, sendo que este fenômeno de torção é verificado com mais intensidade para o mastro com tubos estaleirados.

A norma ABNT NBR 6123:1988 menciona que a máxima velocidade média de uma rajada de vento verificada pelas estações metrológicas da região nordeste do Brasil em médias uma vez em cada 50 anos é de aproximadamente 30 m/s (58,3 Knots), conforme descrito no ANEXO A.

A norma API Spec 4F menciona que as tensões podem ser amplificadas em até 33% quando a estrutura for submetida a um carregamento dinâmico, condições esperadas e inesperadas de tempestade “Vento”, porém neste caso o coeficiente de segurança da estrutura é reduzido para 1,25.

Desta forma, a máxima velocidade de vento que a estrutura sem carregamento de içamento estático e sem tubos estaleirados pode ser submetida é de aproximadamente 117,9 Knots (60,6 m/s) e de aproximadamente 56,3 Knots (28,9 m/s) com a estrutura com tubos estaleirados e sem carregamento de içamento estático.

É importante salientar a diferença de rigor verificada entre as normas LADS e API Spec 4F - 3ª edição: 2008.

A LADS menciona que o mastro deve ser avaliado de acordo com alguns critérios específicos da norma API Spec 4F, porém para a condição de carregamento de içamento estático estabelece um coeficiente mínimo de segurança de 1,30 e não faz nenhuma observação para carregamentos dinâmicos, impacto e fadiga.

Já norma API Spec 4F determina que a estrutura seja avaliada de acordo com os requisitos aplicáveis da norma AISC-360 (Norma específica de construção de estruturas de aço), não sendo permitidas deformações plásticas. A API também menciona cuidados devido às cargas de vento, dinâmica, impactos e vida em fadiga.

O coeficiente de segurança mínimo da AISC-360 é estabelecido de acordo com o modo de falha, sendo que o mastro avaliado o valor mínimo é de 1,67, ou seja, um coeficiente de segurança 28,4% maior do que o valor mínimo recomendado pela norma LADS.

Recomenda-se que após cada manutenção da sonda de produção/perfuração, seja realizado o estudo de verificação técnica analítica acompanhada por um teste de carga, sendo que o teste seja realizado com uma carga de içamento de 50% acima da carga de trabalho do equipamento, num tempo não menor que 5 minutos. Este procedimento é recomendado por algumas normais de equipamentos de içamento, tais como, API RP 8B: 7ª edição:2000.

O ANEXO B, ilustra o teste de carga da sonda apresentada nesta dissertação. O teste foi realizado antes do estudo de verificação técnica analítica pelo método de elementos finitos, situação não muito desejável. Recomenda-se que primeiro seja realizado o estudo de VTA e posteriormente o teste de carga.

O teste de carga da sonda apresentada nesta dissertação foi realizado com uma carga de içamento de 1201,01 kN (270 klbf), aplicado durante 10 minutos. Conforme ilustrado no gráfico da Figura 4.32, verifica-se que para uma carga de 1201,01 kN (270 klbf), o coeficiente de segurança é aproximadamente 1, ou seja, durante o teste de carga estática as tensões nas colunas da estruturas chegaram próxima a tensão de escoamento do material

Devido ao elevado risco relacionados à atividade de intervenção em poço é de fundamental importância o estudo aprofundado em mastros de sondas de produção terrestre de acordo com procedimentos de normas reconhecidas internacionalmente (Ex. API Spec 4F), visando evitar as falhas que tem ocorrido recentemente. Estas falhas têm consequências graves incluindo fatores econômicos, judiciais, sociais e ambientais.

5 CONCLUSÕES

O presente estudo atendeu com êxito seu objetivo principal da elaboração pelo método de elementos finitos do modelo para avaliação dos limites operacionais do mastro de sonda de produção terrestre.

Através do modelo elaborado neste estudo, conclui-se que a estrutura do mastro da sonda de produção terrestre nas condições atuais não atende os valores de carregamento de içamento estático estabelecidos originalmente pelo projeto. Para atender os critérios de segurança estabelecidos pela norma API Spec 4F - 3ª edição: 2008 será necessário realizar uma redução nos limites de carregamentos operacionais simples e combinados do mastro da sonda de produção terrestre analisada.

Desta forma, recomenda-se que seja realizada uma redução na ordem de 41,67% para as Hipóteses A, B e D na condição de operação. Para a Hipótese C na condição de operação recomenda-se uma redução na ordem de 50%.

Também se verificou que as colunas são os elementos de maior gradiente de tensões, sendo que as regiões próximas à mesa do torrasta são as regiões mais solicitadas.

Os resultados foram apresentados de forma gráfica para carregamento de içamento estático e ação do vento. Através dos gráficos da Figura 4.33, Figura 4.34 e Figura 4.35, é possível avaliar o comportamento para cada condição de carregamento simples e combinado, sendo que qualquer valor abaixo da curva atende os requisitos de segurança estabelecidos pela norma API Spec 4F - 3ª edição: 2008.

6 RECOMENDAÇÕES DE TRABALHOS FUTUROS

Através do desenvolvimento do presente estudo recomendam-se as seguintes sugestões de trabalhos futuros:

- Para maior acuracidade e confiabilidade dos resultados presentes neste estudo, sugere-se realizar a instrumentação da estrutura do mastro da sonda de produção terrestre e correlacionar os resultados numéricos com resultados obtidos a partir de um modelo com extensômetros (*Strain Gauges*);
- Realizar um estudo para avaliar a influência das cargas dinâmicas e de impacto sobre a integridade estrutural da estrutura do mastro da sonda;
- Realizar um estudo para avaliar a vida em fadiga da estrutura do mastro da sonda;
- Realizar um estudo para avaliar localmente as junções soldadas e propagação de trincas nestas regiões;
- Realizar um estudo para avaliar a integridade estrutural dos cabos de ancoragem da estrutura do mastro da sonda.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

ABNT - Associação Brasileira de Normas Técnicas. (edificações). *Forças devidas ao vento em*. Rio de Janeiro: ABNT.

ABNT - Associação Brasileira de Normas Técnicas. (1998). *NBR 6123 - Forças devidas ao vento em edificações*. Rio de Janeiro: ABNT.

Almeida, G., Henrique, N. I., & Lemos, S. M. (17 a 20 de Setembro de 2012). ANÁLISE DOS DADOS DIVULGADOS PELOS ÓRGÃOS REGULADORES DE SEGURANÇA OFFSHORE DOS EUA, REINO UNIDO E NORUEGA: PERFÍS TÍPICOS E ANÁLISE DE ADERÊNCIA AO CONCEITO DE INDICADORES DE DESEMPENHO DE SEGURANÇA. *Rio Oil & Gas Expo and Conference 2012*, p. 10.

American Institute of Steel Construction. (2010). *ANSI/AISC 360-10: Specification for Structural Steel Buildings*. Chicago, Illinois: AISC.

American Petroleum Institute. (2000). *ANSI / API RP 8B / ISO 13534-2000: Recommended Practice for Procedures for Inspections, Maintenance, Repair and Remanufacture of Hoisting Equipment Seventh Edition, March 2002*. Washington: API.

American Institute Petroleum. (2004). *Recommended Practice for Use and Procedures for Inspection, Maintenance, and Repair of Drilling and Well Servicing Structures. API RECOMMENDED PRACTICE 4G THIRD EDITION*. Washington: API.

American Petroleum Institute. (2008). *API 4F: Specification for Drilling and Well Servicing Structures (3ª Edição ed.)*. Washington: API.

American Society for Testing and Materials. (2008). *A36/A36M - 08: Standard Specification for Carbon Structural Steel*. [West Conshohocken]: ASTM.

American Society for Testing and Materials. (2009). *A500/A500M - 09: Standard Specification for Cold-Formed Welded and Seamless Carbon Steel Structural Tubing in Rounds and Shapes*. ASTM.

(2011). ANSYS Release 14.0: Getting Started with ANSYS. EUA: ANSYS.

ANSYS Release 14.0: Meshing Help. (2011). ANSYS.

ANSYS Release 14.0: Simulation Help. (2011). ANSYS.

ANSYS Release 14.0: Theory Reference for ANSYS and ANSYS Workbench. (2011). ANSYS.

Associação Brasileira de Normas Técnicas. (2002). *NBR 10520: Informação e documentação: Citações em documentos: Apresentação*. Rio de Janeiro: ABNT.

Associação Brasileira de Normas Técnicas. (2005). *NBR 14724: Informação e documentação: Trabalhos acadêmicos: Apresentação*. Rio de Janeiro: ABNT.

Associação Brasileira de Normas Técnicas. (2002). *NBR 6023: Informação e documentação: Referências: Elaboração*. Rio de Janeiro: ABNT.

Associação Brasileira de Normas Técnicas. (2003). *NBR 6027: Informação e documentação: Sumário: Apresentação*. Rio de Janeiro: ABNT.

Bai, Y., & Bai, Q. (2010). *Subsea Structural Engineering Handbook*. Houston, USA: Elsevier.

Bardy, M., Silveira, D. P., & Sodré, F. (17 a 20 de Setembro de 2012). USE OF SAFETY CASE TO ACCOMPLISH WITH BRAZILIAN REGULATIONS FOR DRILLING UNITS. *Rio Oi & Gas Expo and Conference 2012*, p. 9.

Borges, F. (2011). *Verificação Técnica Analítica: Mastro Triangular - SPT-003*. FB Consulting.

Budynas, R. G., & Nisbett, J. K. (2011). *Shigley's Mechanical Engineering Design* (9ª ed.). Nova Iorque: Editora McGraw-Hill.

Callister, W. D. (2010). *Fundamentals of Materials Science and Engineering* (8ª ed.). Nova Iorque: John Wiley & Sons.

Cook, R. D., Malkus, D. S., & Witt, R. J. (2002). *Concepts and Applications of Finite Element Analysis* (4ª ed.). Nova Iorque: Wiley.

Díaz, S. (2007). *Verificaci n Técnica Analítica PI 398 - PRIDE - PRD-VT07-10-001*. Backing s.r.l, Neuquén - Argentina.

Filho, A. A. (2006). *Elementos Finitos: A Base da Tecnologia CAE* (4ª Edi o ed.). São Paulo: Érica Ltda.

Gieck, K., & Gieck, R. (2003). *Manual de Fórmulas Técnicas*. Alfaomega.

Gunaratne, M. (2006). *THE FOUNDATION ENGINEERING HANDBOOK*. New York: Taylor & Francis Group, LLC.

Hibbeler, R. C. (2010). *Resistência dos Materiais* (7ª ed.). São Paulo: Person Prentice.

LADS - Latin America Drilling Safety. (2007). *Verificaci n Técnica e Inspección de M stiles Petroleros*.

Lyons, W. C. (1996). *Standard Handbook of Petroleum & Natural Gas Engineering* (Vol. 1). Houston, Texas: Gulf Publishing Company.

NORSOK STANDARD. (2013). *Design of steel structures - N-004*. Norsok.

Norsok STANDARD. (2012). *Integrity of offshore structures*. Norsok.

Norton, R. L. (2006). *Projeto de Máquinas: Uma Abordagem Integrada* (2ª ed.). Porto Alegre: Bookman.

Oliveira, V. C. (2004). *Análise da Segurança em Operações Marítimas de Exploração e Produção de Petróleo*. Campinas - SP.

OSHA, O. S. (2007). *OSHRC Docket No. 08-0088*. Washington: OSHA.

Penteadó, S. F. (17 a 20 de Setembro de 2012). DANOS À IMAGEM DA BP DECORRENTES DO ACIDENTE DA PLATAFORMA DEEPWATER HORIZON. *Rio Oil & Gas Expo and Conference 2012*, p. 12.

Schlumberger. (12 de Abril de 2013). *Scribd*. Acesso em 12 de Abril de 2013, disponível em Scribd: <http://pt.scribd.com/doc/60755868/Work-Over-Well-Control>

Shigley, J. E.; Budynas, R. G.; Nisbett, J.K.; *Mechanical Engineering Design*. 9th Edition, New York, McGraw-Hill, 2011.

**APÊNDICE A – METODOLOGIA PARA A DETERMINAÇÃO DA DIREÇÃO DA
CARGA DEVIDA AÇÃO DO VENTO MAIS CRÍTICA ATUANDO SOBRE A
ESTRUTURA**

A.1 CONDIÇÕES GERAIS

Conforme mencionado no capítulo 0, neste apêndice é descrita a metodologia utilizada para a determinação da direção mais crítica de carregamento de vento sobre a estrutura do mastro da sonda.

Com o intuito de abranger as possíveis condições de vento sob a qual a estrutura está exposta, foram consideradas e analisadas 4 direções distintas de vento (θ), conforme ilustrado na Figura A.1.

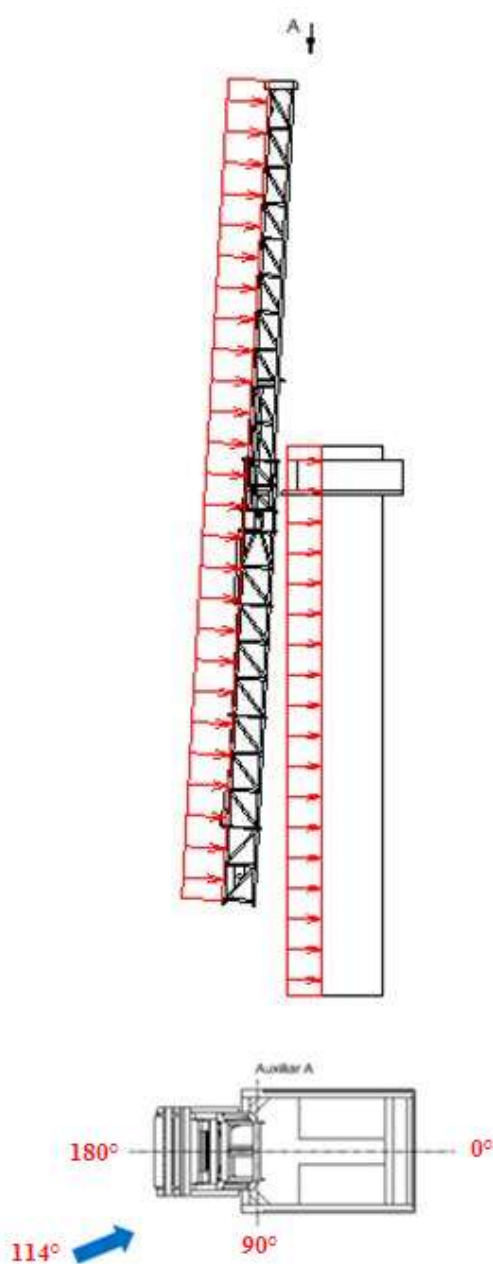


Figura A.1 – Direções de vento analisadas

O ângulo da direção do vento de 114° foi definido com base nas recomendações de LYONS (1996, pag. 513), o qual exemplifica que a direção mais crítica é a que proporciona uma área projetada de maior magnitude, conforme ilustra a Figura A.2.

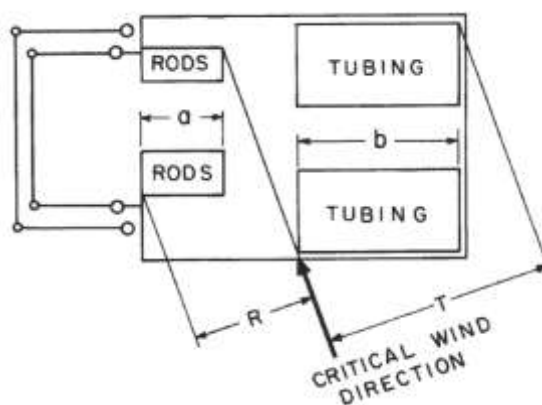


Figura A.2 – Diagrama de área projetada

A.2 DETERMINAÇÃO DA FORÇA DEVIDA A AÇÃO DO VENTO

Segundo o item 8.3 da norma API Spec 4F - 3ªed: 2008, a força que atua sobre a estrutura é definida pela seguinte equação.

$$F_m = 0,00338 \times K_i \times V_z^2 \times C_s \times A$$

Onde:

F_m : Força do vento [lbf];

K_i : Fator de correção devido ao ângulo de inclinação da estrutura;

V_z : Velocidade do vento corrigida [nós];

C_s : Fator de forma;

A : Área projetada da estrutura [ft²];

Para corrigir a força do vento em relação ao ângulo de inclinação da estrutura (ϕ), conforme ilustra a Figura A.3, a norma define um fator de correção, identificada como K_i e definido pela equação abaixo.

$$K_i = \text{sen}^2 \phi$$

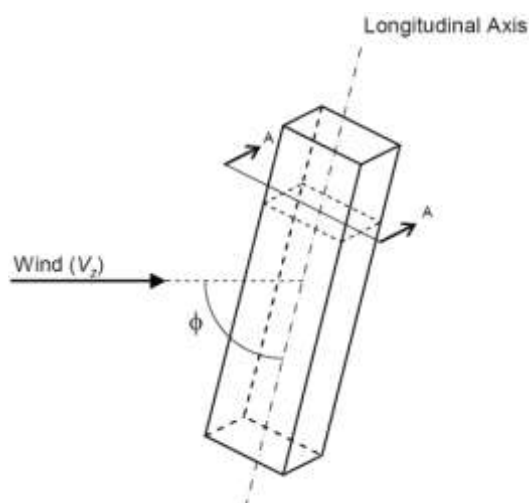


Figura A.3 – Ângulo de inclinação (ϕ) entre a direção do vento e o eixo longitudinal da estrutura

Na Tabela A, são descritos os valores correspondentes à direção do vento e o ângulo de inclinação da estrutura e os resultados para o fator de correção K_i correspondentes.

Tabela A.1 – Fator de correção e ângulo de inclinação de acordo com a direção do vento

Posição	Direção do Vento, θ [°]	Ângulo de Inclinação, ϕ [°]	Fator de Correção, K_i
1	0,0	92,75	0,9977
2	90	90	1
3	114	87,5	0,9980
5	180,0	87,25	0,9977

Conforme os dados descritos na tabela acima, os valores de fator de inclinação para cada posição de acordo com a direção do vento ficaram aproximadamente iguais, logo, visando a segurança, foi utilizado K_i igual a 1.

De acordo com a norma API Spec 4F - 3ª ed: 2008, a velocidade corrigida (V_z) é definida pela seguinte equação:

$$V_z = V_{des} \times \beta$$

Onde:

V_{des} : Velocidade de projeto [nós];

β : Fator de elevação

Neste estudo, foi considerado um fator de elevação correspondente à altura total da estrutura 108 ft (32,92m). Desta forma, de acordo com a tabela 8.4 da norma API Spec 4F - 3ª Ed: 2008, o valor para o fator de elevação é igual a 1,13. O fator de forma (C_s), definido pela norma API Spec 4F - 3ª ed: 2008 na tabela 8.6, foi considerado para a estrutura e tubos estaleirados o valor de 0,8, pois a estrutura da sonda é constituída na sua maioria por tubos de seção redondo.

Na Tabela A.2, são descritos os resultados da força devida ação do vento agindo sobre a estrutura com tubos estaleirados, devido à variação da direção da ação do vento sobre a estrutura da sonda de produção terrestre.

Tabela A.2 – Força do vento na estrutura de acordo com a direção do vento e velocidade com tubos estaleirados

Direção do Vento θ [°]	Área Projetada m^2 / [ft ²]	Força do Vento F_m N / [lbf]	
		Velocidade m/s / [Knots]	
		12,86 / [25]	30,87 / [60]
0,0	13,87 / [149,30]	1433,05 / [322,16]	8254,74 / [1855,68]
66	36,54 / [393,31]	3775,32 / [848,73]	21746,10 / [4888,72]
114	83,15 / [895,02]	8591,08 / [1931,35]	49485,18 / [11124,71]
180	28,19 / [303,43]	2912,60 / [654,78]	16776,76 / [3771,56]

Na Tabela A.3, são descritos os resultados da força devida ação do vento agindo sobre a estrutura sem tubos estaleirados, devido à variação da direção da ação do vento sobre a estrutura da sonda de produção terrestre.

Tabela A.3 – Força do vento na estrutura de acordo com a direção do vento e velocidade sem tubos estaleirados

Direção do Vento θ [°]	Área Projetada ft^2 / (m ²)	Força do Vento F_m lbf / [N]	
		Velocidade Knots / [m/s]	
		12,86 / [25]	30,87 / [60]
0,0	28,19 / [303,43]	2912,80 / [654,82]	16777,10 / [3771,64]
66	36,54 / [393,31]	3775,58 / [848,78]	21746,54 / [4888,82]
114	36,54 / [393,31]	3775,58 / [848,78]	21746,54 / [4888,82]
180	28,19 / [303,43]	2912,80 / [654,82]	16777,10 / [3771,64]

No gráfico da Figura A.4, é ilustrado a variação da força adicional agindo sobre a estrutura em função da variação da direção da ação do carregamento de vento de 12,86 m/s (25 Knots).

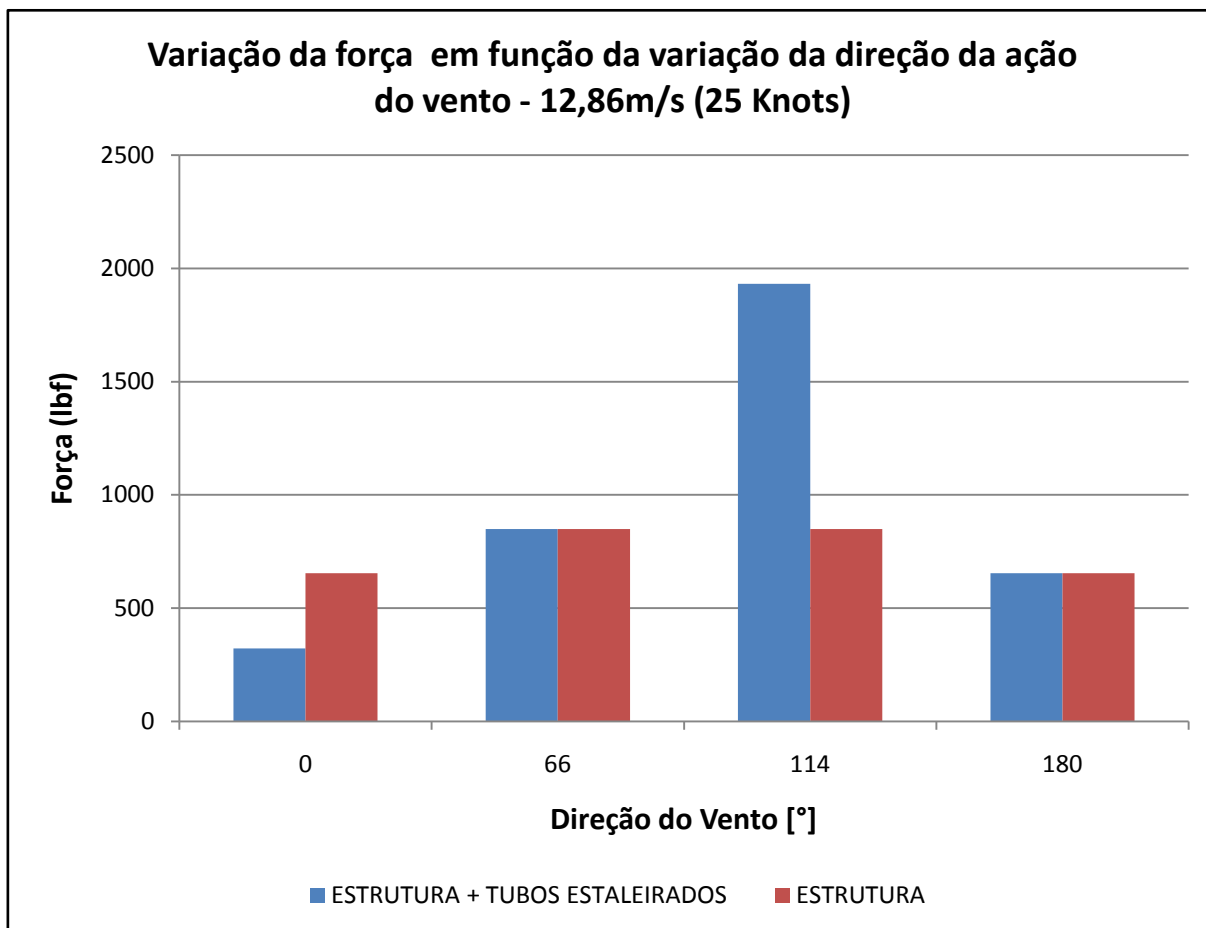


Figura A.4 – Variação da força x Direção do Vento 12,86 m/s (25 Knots)

Conforme ilustrado o gráfico da Figura A.4, verifica-se que para velocidade de vento de 12,86 m/s (25 Knots) na direção de 114°, a carga adicional agindo sobre o mastro com tubos estaleirados é de 8591,08N (1931,35 lbf) e de 3775,58N (848,78 lbf) para o mastro sem tubos estaleirados.

No gráfico da Figura A.5, é ilustrado a variação da força adicional agindo sobre a estrutura em função da variação da direção da ação do carregamento de vento de 30,87 m/s (60 Knots).

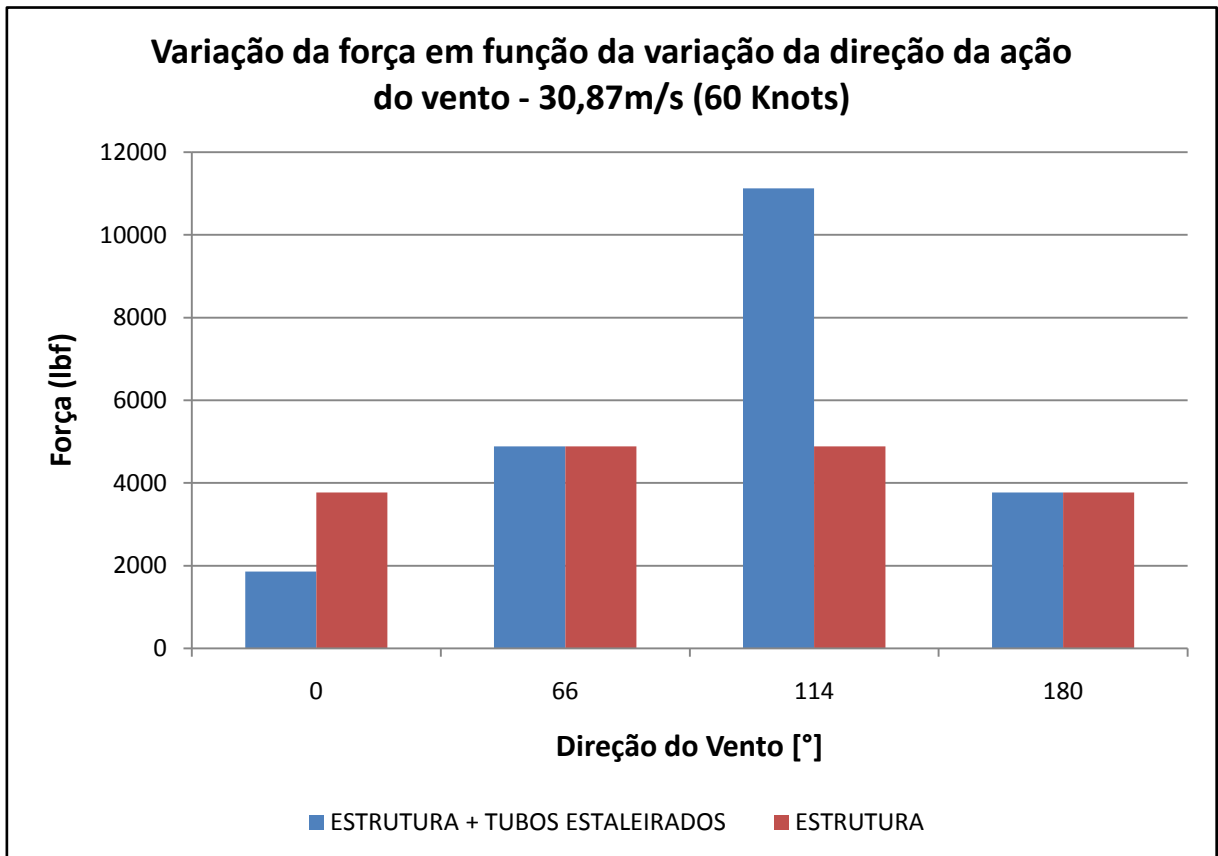


Figura A.5 – Variação da força x Direção do Vento 30,87 m/s (60 Knots)

Conforme ilustrado o gráfico da Figura A.5, verifica-se que para velocidade de vento de 30,87 m/s (60 Knots) na direção de 114°, a carga adicional agindo sobre o mastro com tubos estaleirados é de 49485,18 N (11124,71 lbf) e de 21746,54 N (4888,82 lbf) para o mastro sem tubos estaleirados.

APÊNDICE B – DETERMINAÇÃO DA TENSÃO ADMISSÍVEL DE FLAMBAGEM

Sempre que projetamos ou analisamos um elemento estrutural, é necessário que ele satisfaça requisitos específicos de resistência, deflexão e estabilidade. Todavia, alguns elementos estruturais podem estar sujeitos a cargas de compressão e, se forem compridos e esbeltos, a carga poderá ser grande o suficiente para provocar uma deflexão ou uma oscilação lateral. Com frequência a flambagem de uma coluna pode resultar em uma falha repentina e dramática de uma estrutura ou mecanismo e, por isso, é preciso dedicar especial atenção ao projeto de colunas para que estas possam suportar com segurança as cargas pretendidas sem sofrer flambagem (HIBBELER, 2010).

Neste apêndice é descrito o procedimento para verificação da tensão crítica de flambagem devido à compressão, conforme requisitos da norma AISC 360-10, assim como a resistência admissível de flambagem por compressão, conforme descrito no capítulo 3.6 deste trabalho.

B.1 AISC 360-10 – CAPÍTULO B SEÇÃO B4 – MEMBER PROPERTIES

As seções dos elementos utilizados para a construção da sonda devem ser classificadas em elementos não esbeltos ou esbeltos. Para os elementos não esbeltos, a razão (D/t) entre o diâmetro externo da coluna (D) e a espessura do elemento (t) não deve exceder λ_r . Caso esta razão exceda λ_r o elemento é considerado esbelto. De acordo com a Tabela B4.1a da norma, temos.

$$\lambda_r = 0,11 \frac{E}{F_y}$$

Onde:

λ_r : Limite da razão de esbeltez;

E : Módulo de elasticidade do material [MPa];

F_y : Tensão de escoamento do material [MPa];

Na Figura B.1, estão identificadas às colunas consideradas nesta análise, assim como o comprimento das mesmas (L), e na estão descritos os tipos de elementos, conforme classificação da norma AISC 360-10 no que tange a análise de flambagem.

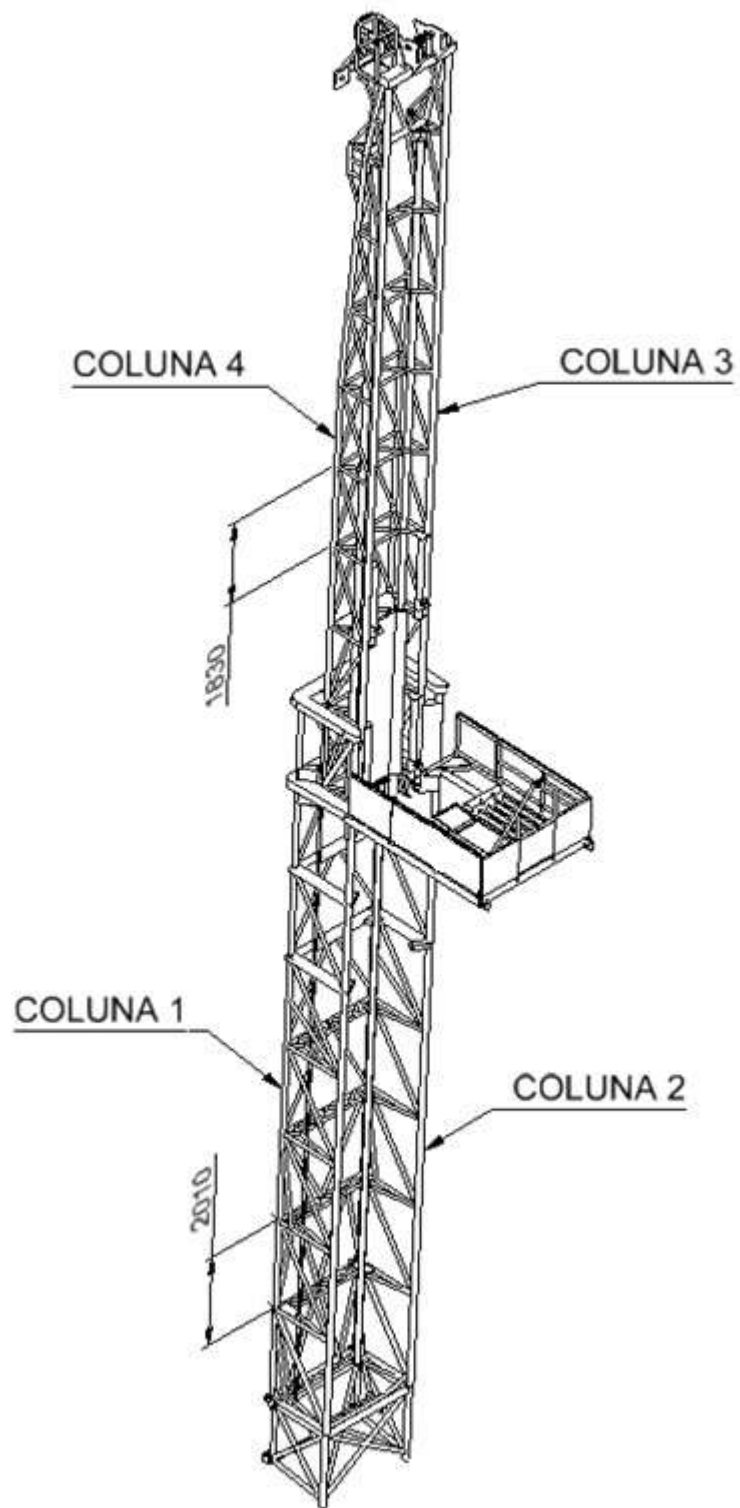


Figura B.1 – Identificação dos elementos

Tabela B.1 – Classificação dos elementos

Componente Estrutural	Material	Razão D/t	Limite da Razão de Esbeltez, λ_r	Tipo de Elemento
Coluna 1	ASTM A500 Gr. C	16,13	70,54	Não-esbelto
Coluna 2		13,33		Não-esbelto
Coluna 3		13,33		Não-esbelto
Coluna 4		20,32		Não-esbelto

B.2 AISC 360-10 – CAPÍTULO E – DESIGN OF MEMBERS FOR COMPRESSION

De acordo com a tabela E1.1 da respectiva norma, o cálculo para determinar a tensão crítica dos elementos deve ser de acordo com a seção E3 – Flambagem por Flexão de Membros sem Elementos Esbeltos “*Flexural Buckling of Members without Slender Elements*”.

B.2.1 AISC 360-10 – Capítulo E Seção E3 – Flambagem por Flexão de Membros sem Elementos Esbeltos “*Flexural Buckling of Members without Slender Elements*”

Desta forma, a tensão crítica de flambagem (F_{cr}) para elementos não esbeltos devido ao carregamento axial de compressão é determinada de acordo com os seguintes critérios.

Quando,

$$\frac{KL}{r} \leq 4,71 \sqrt{\frac{E}{F_y}} \rightarrow F_{cr} = \left[0,658 \frac{F_y}{F_e} \right] F_y$$

Ou,

$$\frac{KL}{r} > 4,71 \sqrt{\frac{E}{F_y}} \rightarrow F_{cr} = 0,877 F_e$$

Onde F_e é determinado através da seguinte equação:

$$F_e = \frac{\pi^2 E}{\left(\frac{KL}{r}\right)^2}$$

Sendo:

K : Fator de comprimento efetivo, $K=1$;

L : Comprimento do elemento sob compressão [mm];

r : Raio de giração [mm];

F_{cr} : Tensão crítica de flambagem [MPa];

F_e : Tensão elástica de flambagem [MPa];

B.3 ANÁLISE DOS RESULTADOS

De acordo com procedimento da norma AISC 360-10 descrito anteriormente, segue na Tabela B.2 os resultados de tensão crítica e a admissível para cada coluna analisada.

Tabela B.2 – Resultado da tensão crítica e admissível das colunas analisadas

Componente Estrutural	Comprimento da Coluna, L [mm]	Raio de Giração, r [mm]	Tensão Elástica de Flambagem, F_e [MPa]	Tensão Crítica, F_{cr} [MPa]	Resistência Admissível, R_a [MPa]
Coluna 1	2010	33,77	562,66	249,20	149,22
Coluna 2	2010	41,67	856,85	270,08	161,72
Coluna 3	1830	41,67	1033,70	277,28	166,04
Coluna 4	1830	34,19	696,27	260,66	156,08

Conforme apresentado na Tabela B.2, a estrutura do mastro da sonda fica limitada a uma tensão de aproximadamente 149,22 MPa.

APÊNDICE C – ANÁLISE DE CONVERGÊNCIA DE MALHA

A análise de convergência foi realizada através da comparação de simulações com diferentes níveis de refinamento da malha.

Segundo COOK (2002), um erro de até 5% na discretização do modelo é aceitável, sendo este critério adotado para as análises deste relatório. Para todos os casos, primeiramente foi realizada uma simulação adotando-se uma malha com certo nível de refinamento. Após, realizou-se novamente a simulação, porém, com uma malha com uma redução de aproximadamente 10% do tamanho de elemento em toda estrutura.

A seguir são apresentados os resultados comparativos em termos de nós e elementos das malhas de ambas as simulações.

Tabela C.1 – Diferença em termos de nós e elementos entre as malhas geradas

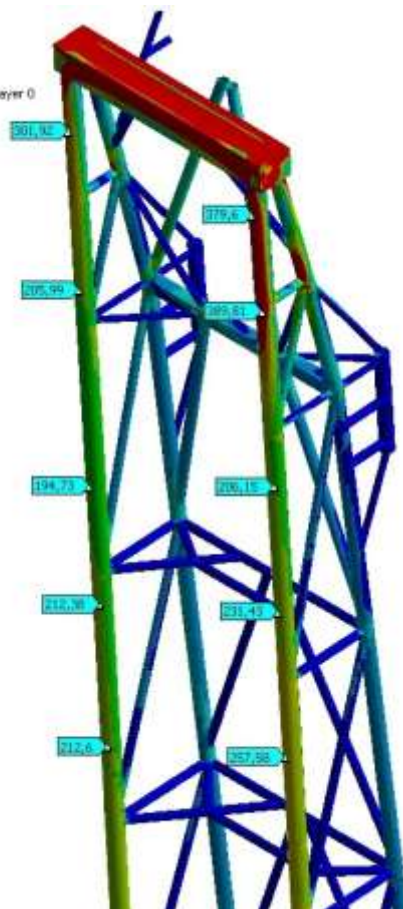
Número	Malha Original	Número de elementos	Diferença
Nós	255651	331086	29,50%
Elementos	236435	315818	33,57%

Nas páginas a seguir se encontram os resultados de forma detalhada da deformação total da estrutura e tensões nas regiões analisadas.

Tensões nas colunas mastro superiores

A: Içamento_PreCarga_300
 Equivalent Stress_Convergência
 Type: Equivalent (von-Mises) Stress - Top/Bottom - Layer 0
 Unit: MPa
 Time: 2
 05/03/2013 14:02

5824 Max
 315
 275,63
 236,25
 196,88
 157,5
 118,13
 78,75
 39,375
 3,35e-9 Min



Tensões nas colunas mastro superiores com a malha refinada

G: Içamento_PreCarga_300_Refinado_20mm
 Equivalent Stress_Convergência
 Type: Equivalent (von-Mises) Stress - Top/Bottom - Layer 0
 Unit: MPa
 Time: 2
 05/03/2013 14:25

4924,6 Max
 315
 275,63
 236,25
 196,88
 157,5
 118,13
 78,75
 39,375
 2,7703e-9 Min

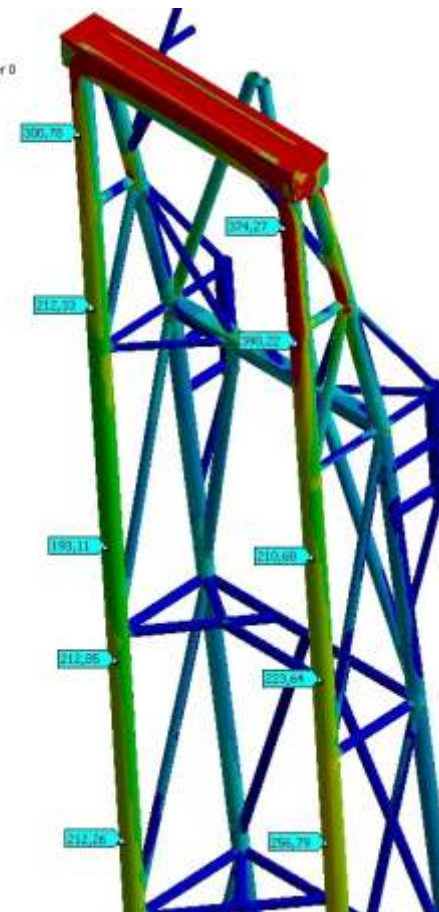


Figura C.1 – Tensões nos tubos das colunas do mastro superior da estrutura

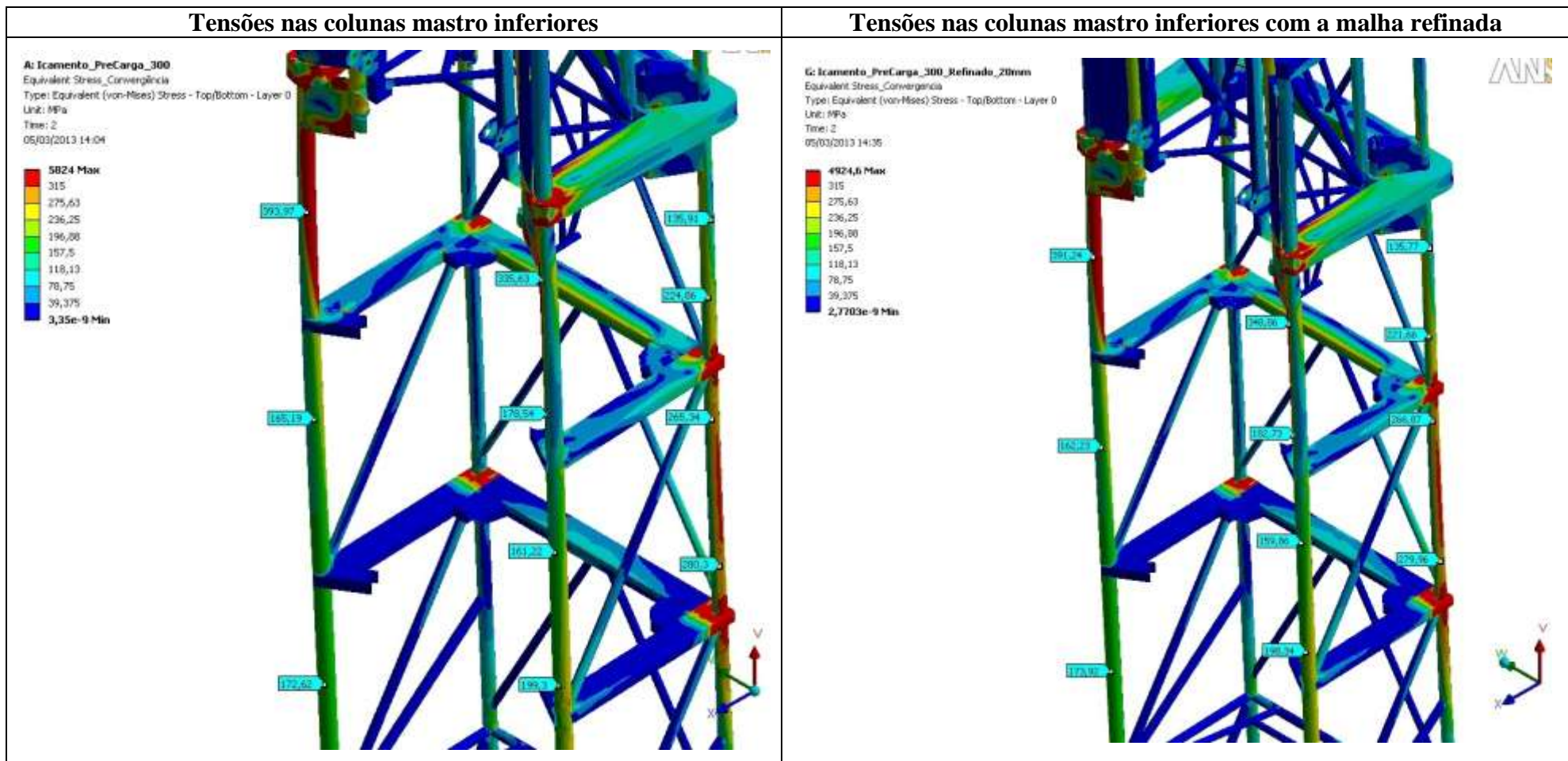


Figura C.2 – Tensões nos tubos das colunas do mastro inferior da estrutura

Através das análises de convergência, verifica-se que o erro da malha encontra-se dentro dos limites estabelecidos pela bibliografia.

**APÊNDICE D – PROCEDIMENTO PARA LEVANTAMENTO DAS INFORMAÇÕES
DO MASTRO DE SONDA DE PRODUÇÃO TERRESTRE DE POÇOS DE
PETRÓLEO**

1. Informações da placa de identificação do mastro da sonda;	
1.1. Fabricante:	
1.2. Endereço:	
1.3. Data de fabricação:	
1.4. Número de série:	
1.5. Altura:	
1.6. Peso Próprio:	
1.7. Máximo range de carregamento estático no gancho:	
1.8. Máximo range de projeto da velocidade de vento:	
1.9. Elevação da base da torre/mastro acima do nível do solo usada em projeto para carregamentos de vento:	
1.10. Modelo:	
1.11. Distância de instalação do mastro para estai/guy line:	
1.11.1. Distância do centro do poço até a âncora da espia de vento em X	
1.11.2. Distância do centro do poço até a âncora da espia de vento em Y	
1.11.3. Distância do centro do poço até a âncora da espia de vento em Z	

1.11.4. Diâmetro da Espia de Carga	
1.11.5. Diâmetro da Espia da Mesa do Torrista	
1.11.6. Diâmetro da Espia de Vento A	
1.11.7. Diâmetro da Espia de Vento B	
1.11.8. Diâmetro da Espia C – Mesa do torrista	
1.11.9. Diâmetro da Espia D – Estrutura Inferior do Mastro	
1.11.10. Diâmetro do Cabo da Catarina (linha rápida/morta)	
1.11.11. Diâmetro do Cabo do Pistoncio	
2. Informações da placa de identificação da subestrutura da sonda;	
2.1. Fabricante:	
2.2. Endereço:	
2.3. Data de fabricação:	
2.4. Número de série:	
2.5. Máximo range de carregamento estático no gancho:	
2.6. Máximo range de capacidade rotativa estática:	
2.7. Máximo range da capacidade de estaleiramento:	
2.8. Máximo range combinado de carga estático do gancho e capacidade de peso de tubos estaleirados que podem ser suportado pela subestrutura:	
2.9. Máximo range de capacidade rotativa estática e capacidade de peso de tubos estaleirados que podem ser suportado pela subestrutura:	
2.10. Máximo range de velocidade de vento de projeto com tubos estaleirados completo:	
2.11. Máximo range de velocidade de vento de projeto, sem tubos estaleirados:	
2.12. Elevação da base da subestrutura acima do nível do solo usada em projeto para carregamentos de vento:	
3. Outras informações relevantes \ Observações:	

**11000'-13000' MAXIMUM WORKOVER RANGE, 27/8" DP, DOUBLES
15000'-18000' MAXIMUM SERVICING RANGE, 27/8" EUE TBG, DOUBLES
500 HORSEPOWER
MECHANICAL DRIVE: ONE ENGINE WITH COMBINATION TORQUE
CONVERTER/TRANSMISSION**

deadline anchor and front and rear derrick supports built into the carrier frame. Carrier capacity is 112,000#.

SUBSTRUCTURE— A choice of telescoping, grasshopper or single piece

substructures with laterally wind guyed heavy duty derrick cross bases or with external wind guide derrick bases may be used with this versatile rig. See pages 22 and 23 for details.

STANDARD RIG SPECIFICATIONS

TYPICAL FACTORY WEIGHTS AND DIMENSIONS

	Weights, Lbs.			Dimensions, Ft.		
	Front	Rear	Total	Length	Width	Height
Basic Unit	45,100	54,800	99,700	64' 9"	8' 9"	14' 0"
Default for Removable Sand Drum	2,100	3,100	5,200	—	—	—

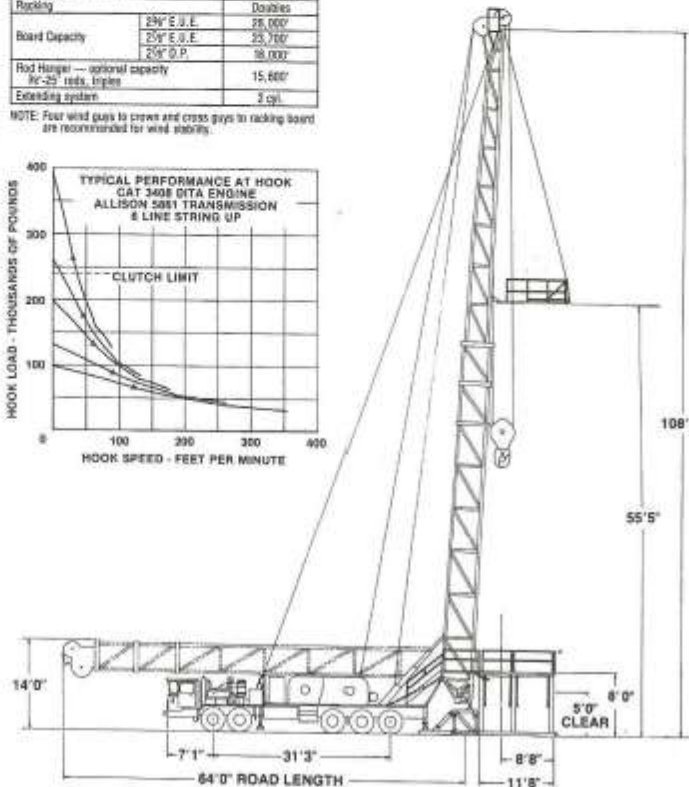
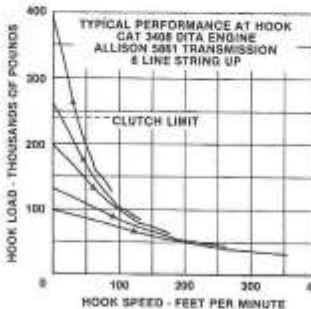
DRAWWORKS SPECIFICATIONS

	MAIN DRUM	REMOVABLE SAND DRUM (50) Lb
Drawworks Model	1280W	160
Barrel Diameter — Less Jacket	19 1/2"	13 1/2"
— With Jacket	19 1/2"	14"
Distance Between Flanges	34"	42"
Brake Rim — Diameter	42"	42"
— Width	12"	9"
Effective Brake Area	3050	2030
Sts. In.	36	16
Brake Cooling Water	Circulating	Spillback
Drum Cutout	24" x 7 Ft. Ht. Intc.	18" x 2 Ft. Ht. Intc.
Single Line P.L.B.	Bare Barrel 41,000# Line on Jacket 42,000# (50% Full) 24,000#	29,000# — 12,000#
Line Capacity	1/2" 11,500' 3/4" 8,300' 1" 6,500'	16,000' 12,000' 8,870'
Jackshaft Clutches	18" x 2 Plate	—
Drum Drive Chain — Dr. Bats	1 1/2" Triple (450 HP)	1 1/2" Single
Jackshaft Drive Chain — Dr. Bats — Single Speed Gearboxes	1" Quad.	—
Wash Drive — Dr. Bats	1 1/2" Triple	—
Horsepower Input (Max.)	500 H.P.	—
Gearing, Counterbalanced Lebas	1"	—

DERRICK SPECIFICATIONS

Derrick	108-300 ()
Height — (Ground to water table)	108'
Over-the-road length	64' 0"
API Hook Loads for indicated number of lines	5 201,000# 8 300,000# 10 312,000#
Rated tilt angle	25°
Standard crown shaves	1-36" 4-33"
Racking	Doubles
Board Capacity	2 1/2" E. J. E. 28,000# 2 1/2" E. J. E. 25,700# 2 1/2" O. P. 18,000#
Rod Hanger — optional capacity	15,000#
9C-25 rods, Inlets	—
Extending system	2 cyl.

NOTE: Four wind guys to crow and cross guys to racking board are recommended for wind stability.



CARRIER SPECIFICATIONS

CARRIER MODEL	05-552-300
WHEELBASE (From centerline of front axle or tandem to centerline of rear tandem)	300"
TYPE FRAME (H-strength steel)	27" Feb. Channel
TYPE SUSPENSION	Front-Spring Rear-Rubbing Beam Third-Axe-Air
FRONT AXLE SERVICE RATING	27,000# 44,000#
REAR AXLE SERVICE RATING	Triple w/400 DP 68,000#
STANDARD TIRES	Front: 13.00 x 22.5 12 Ply Duplex Rear: 11.00 x 20 12 Ply Nylon
ENGINES (H.P. or H.P.M.)	Det. Diesel 15V-71T With CLT 5880 Allison Transmission (456 H.P. or 2100) Caterpillar 3408 With CLT 5880 Allison Transmission (505 H.P. or 2100) Det. Diesel 15V-71T With CLT 5880 Allison Transmission (493 H.P. or 2100)

Note: Horsepowers shown are manufacturer's ratings based on SAE standard conditions (500 ft. elevation & 65°F. temperature). Deduct for sea, compressor, power steering pumps, intake & exhaust systems.

**APÊNDICE E – ATIVIDADES REALIZADAS DURANTE O DESENVOLVIMENTO
DO ESTUDO**

CRONOGRAMA DE ATIVIDADES

ID	Nome da tarefa	Oktobur												Novembro				Dezembro				Janeiro	
		30/09	07/10	14/10	21/10	28/10	04/11	11/11	18/11	25/11	02/12	09/12	16/12	23/12	30/12	06/01	13/01	20/01					
0																							
1	ATIVIDADES REALIZADAS PARA DESENVOLVIMENTO DO TRABALHO																						
1	1 PROJETO INFORMACIONAL																						
2	1.1 Levantamento das dimensões do mastro da sonda																						
3	1.1.1 Medição da sonda																						
4	1.1.2 Identificação dos perfis do mastro da sonda																						
5	1.1.3 Medição da espessura dos perfis tubulares do mastro da sonda																						
6	1.2 Levantamento das características geométricas do mastro da sonda																						
7	1.2.1 Forma de fixação (Ex. Estal / Guy Line);																						
8	1.2.2 Quantidades de estais utilizados para fixação;																						
9	1.2.3 Ângulo de deflexão entre os estais;																						
10	1.2.4 Distância dos estais em relação ao centro da estrutura;																						
11	1.2.5 Diâmetro do estal;																						
12	1.2.6 Pré-tensionamento em cada estal;																						
13	1.2.7 Forma de encaixe dos módulos superior e inferior;																						
14	1.2.8 Ângulo de operação da estrutura (Ângulo em relação ao eixo vertical);																						
15	1.2.9 Peso do Mastro;																						
16	1.3 Levantamento/identificação dos materiais utilizados na fabricação do mastro da sonda																						
17	1.4 Levantamento das condições ambientais da região de operação da sonda																						
18	1.6 Levantar informações da placa de identificação do mastro da sonda																						
19	1.6.1 Fabricante;																						
20	1.6.2 Endereço;																						
21	1.6.3 Data de fabricação;																						
22	1.6.4 Número de série;																						
23	1.6.5 Altura;																						
24	1.6.6 Peso Próprio;																						
25	1.6.7 Máximo range de carregamento estático no gancho com estal, caso aplicável;																						
26	1.6.8 Máximo range de projeto da velocidade de vento;																						
27	1.6.9 Elevação da base da torre/mastro acima do nível do solo usada em projeto para carregamentos de vento;																						
28	1.6.10 Distância de instalação do mastro para mastros com estal/guy line;																						
29	1.6.11 Outras informações;																						
30	1.8 Levantar as informações na placa de identificação da subestrutura da sonda																						
31	1.8.1 Fabricante;																						
32	1.8.2 Endereço;																						
33	1.8.3 Data de fabricação;																						
34	1.8.4 Número de série;																						
35	1.8.5 Máximo range de carga estática do gancho;																						
36	1.8.6 Máximo range de capacidade rotativa estática;																						
37	1.8.7 Máximo range da capacidade de recuo da tubulação;																						
38	1.8.8 Máximo range combinado de carga estática do gancho e capacidade de peso de tubulares que podem ser suportado pela subestrutura;																						
39	1.8.9 Máximo range de capacidade rotativa estática e capacidade de peso de tubulares que podem ser suportado pela subestrutura;																						
40	1.8.10 Máximo range de velocidade de vento de projeto, com tubulares;																						
41	1.8.11 Máximo range de velocidade de vento de projeto, sem tubulares;																						
42	1.8.12 Elevação da base da subestrutura acima do nível do solo usada em projeto para carregamentos de vento;																						
43	1.7 Levantar as informações na placa de identificação do Crown Block Assembly (Caso aplicável)																						
44	1.7.1 Fabricante;																						
45	1.7.2 Endereço;																						
46	1.7.3 Data de fabricação;																						
47	1.7.4 Número de série;																						
48	1.7.5 Altura;																						
49	1.7.6 Peso Próprio;																						
50	1.7.7 Máximo range de carregamento estático no gancho;																						
51	1.8 Levantamento dos carregamentos utilizados na operação																						
52	1.8.1 Máximo range de carregamento rotativo/Frequência/Rotação;																						
53	1.8.2 Máximo range de carregamento estático do gancho;																						
54	1.8.3 Máximo range de peso de tubulares que podem ser suportado pela subestrutura;																						
55	1.8.4 Peso próprio da estrutura;																						
56	1.8.5 Peso dos fluidos em toda tubulação e tanques incorporados a estrutura;																						
57	1.9 Levantamento das condições climáticas da região																						
58	1.9.1 Velocidade de vento;																						
59	1.9.2 Histórico de tempestade, furacões (Caso aplicável);																						
60	1.9.3 Carregamentos devido a terremotos (Caso aplicável);																						
61	1.10 Levantamento das cargas dinâmicas/impacto;																						
62	1.11 Levantamento das cargas produzidas no mastro e seus suportes ou em sua subestrutura durante a elevação e abaixamento;																						
63	1.12 Cargas de transporta;																						
64	1.13 Modelamento CAD 3D da sonda																						
65																							
66	2 PROJETO CONCEITUAL																						
67	2.1 Estudo de normas																						
68	2.1.1 API SPEC 4F - Specification for Drilling and Well Servicing Structures																						
69	2.1.2 ANSI/AISC 360-10 - Specification for Structural Steel Buildings																						
70	2.1.3 NBR 6123-88 - Forças devidas ao vento em edificações																						
71	2.1.4 LADG - Verificação Técnica e Inspeção de Mastros Petrolieros																						
72	2.1.5 Outras normas mencionadas na API 4F																						
73	2.2 Análise crítica das normas																						
74	2.3 Estudo dos orrntérios de análises																						
75	2.4 Estudo do conceito do tipo de análise de elementos finitos																						
76	2.4.1 Modelo de elemento a ser adotado (Viga, Casca, Sólido)																						
77	2.4.2 Estudo da malha																						
78	3 PROJETO DETALHADO																						
79	3.1 Elaboração do modelo de elementos finitos do mastro da sonda																						
80	3.2 Análises dos resultados elementos finitos do mastro da sonda																						
81	3.3 Elaboração do relatório do estudo de verificação técnica analítica (VTA) do mastro da sonda																						

APÊNDICE F – DESLOCAMENTO DO MASTRO

Conforme ilustrado no gráfico da Figura 4.32, verificou-se que o gráfico apresentou um ponto de inflexão no deslocamento do mastro para valores de carregamento de içamento estático entre 0 Klb e 50 Klb para as condições A,B, C e D.

Para as condições A e B as simulações foram realizados com dois *load steps*, sendo que no 1º *load step* foram inseridas a carga devido à gravidade + pré-carga nas espias de vento e no 2º *load step* foi acrescentada a carga de içamento.

Para as condições C e D as simulações foram realizados com três *load steps*, sendo que no 1º *load step* foram inseridas a carga devido à gravidade + pré-carga nas espias de vento, no 2º *load step* foi acrescentada a carga de vento e no 3º *load step* foi acrescentada a carga de içamento estático.

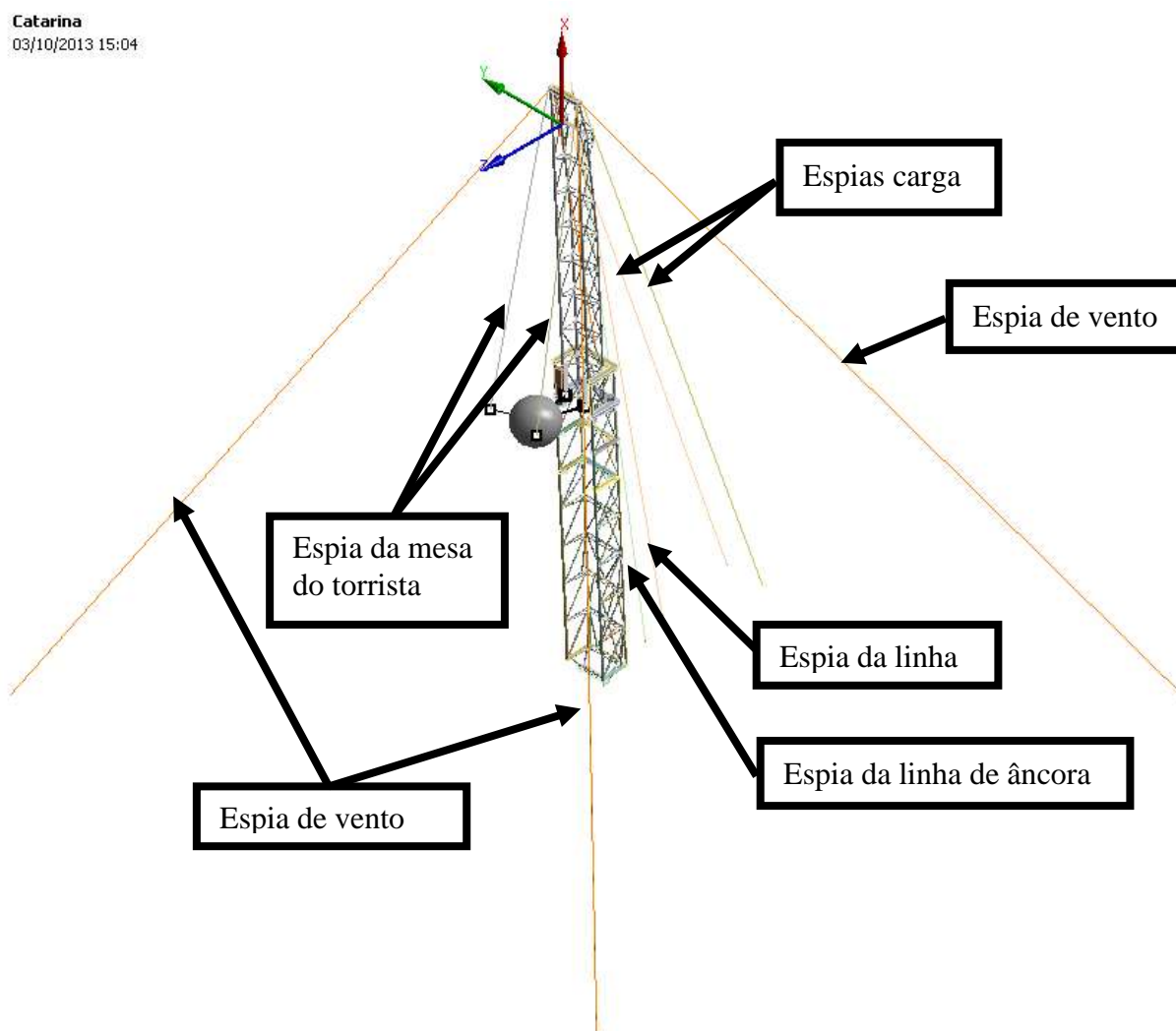


Figura F.1 – Configuração das espias do mastro

A estrutura foi modelada considerando 4 espias de vento, 2 espias de carga, 2 espia da mesa do torrasta, 1 espia da linha rápida e 1 espia da linha de ancora, conforme ilustrado na Figura F.1.

Devido a uma maior quantidade de espias na parte traseira da estrutura ao aplicar os carregamentos do primeiro *load step*, à tendência da estrutura é apresentar um deslocamento no sentido $-Z$, sendo que com o acréscimo do carregamento de içamento estático a tendência é ocorrer um deslocamento no sentido $+Z$.

A Figura A.2, ilustra a aplicação dos carregamentos devido ação da gravidade mais pré-carga nas espias de vento, aplicados no 1º *load step* da simulação.

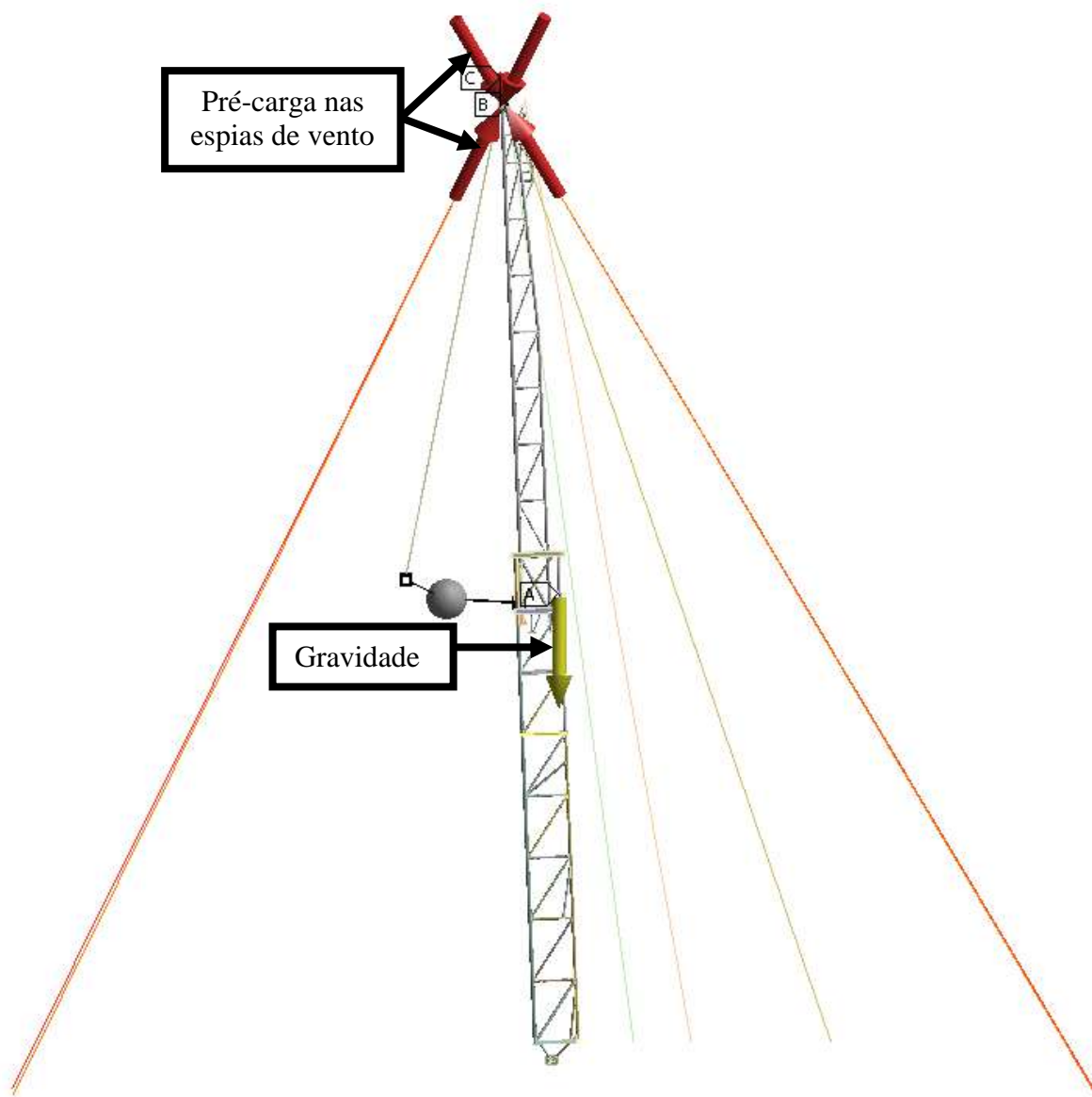


Figura F.2 – Carregamentos do 1º *load step*, gravidade + pré-carga nas espias de vento

A Figura F.3, ilustra a posição deformada após aplicação do carregamento devido ação da gravidade mais pré-cargas nas espigas de vento. Conforme ilustrado, verifica-se que o maior deslocamento ocorre no sentido $-Z$, após aplicação dos carregamentos do 1º *load step*.

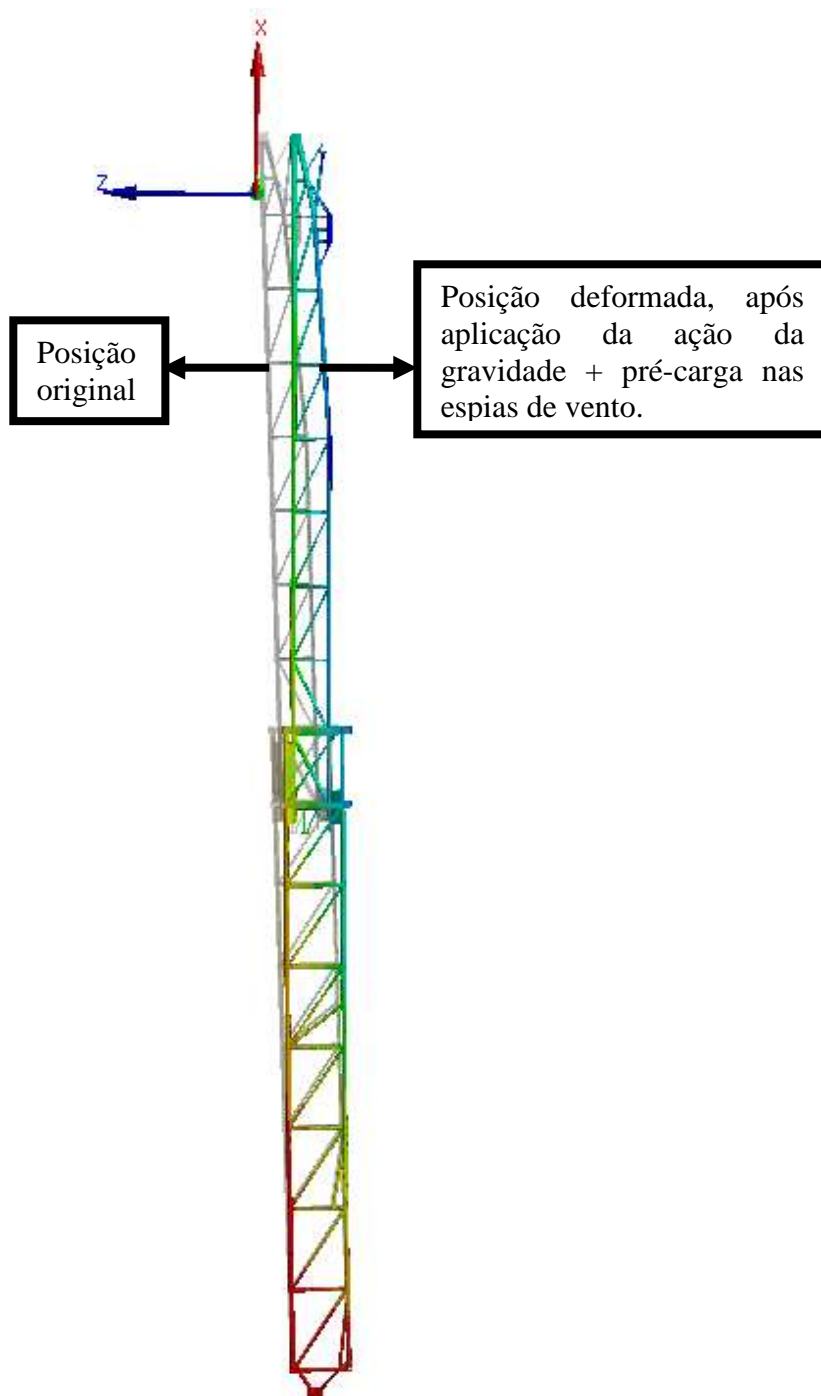


Figura F.3 – Posição da deformada após aplicação dos carregamentos do 1º *load step*

A Figura F.4, ilustra a posição os carregamentos devido ação da gravidade mais pré-carga nas espigas de vento mais carga de içamento, aplicados no 2º load step da simulação.

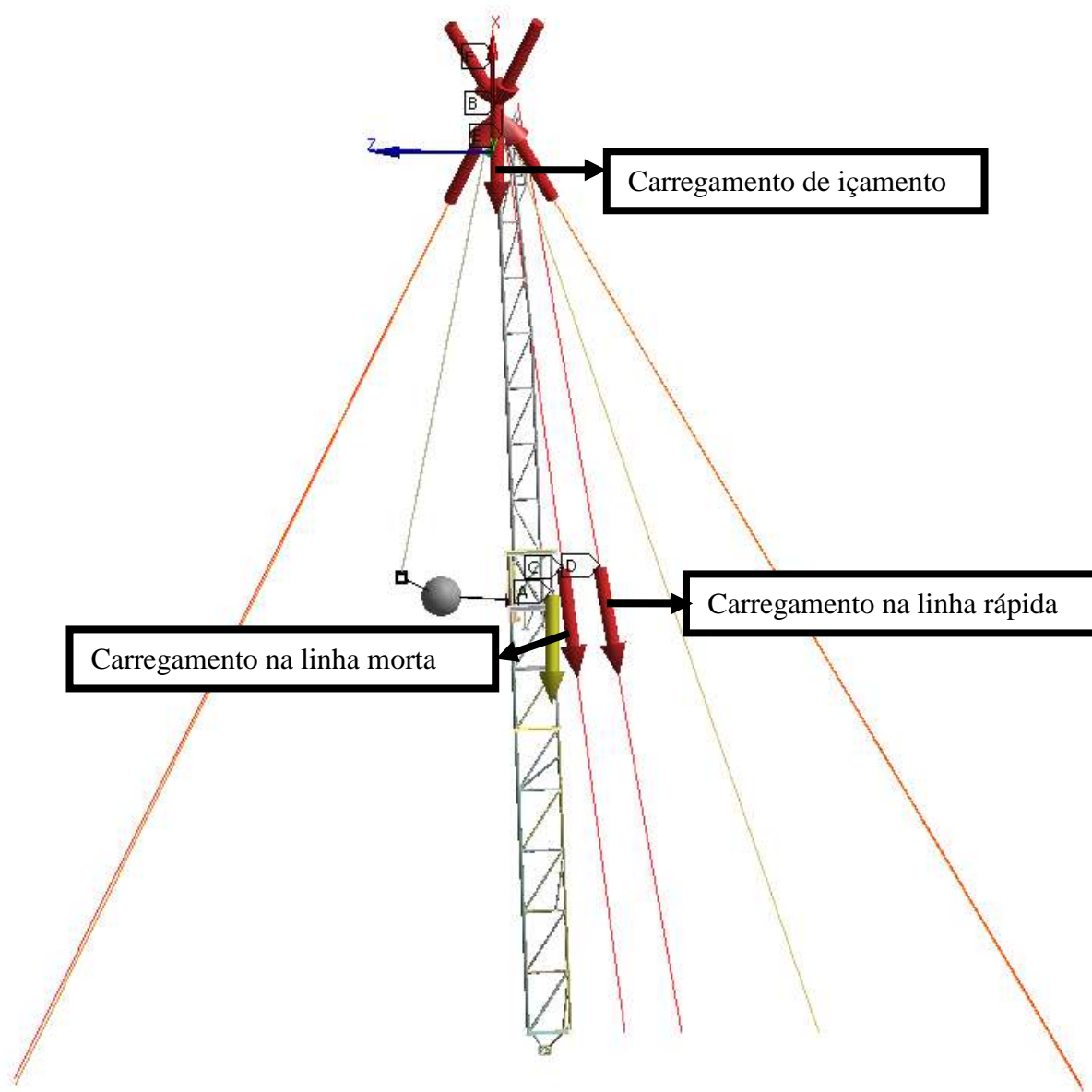


Figura F.4 – Carregamentos do 2º *load step*, gravidade + pré-carga nas espigas de vento + carregamento de içamento estático

A Figura F.5, ilustra a posição deformada após aplicação do carregamento devido ação da gravidade mais pré-cargas nas espigas de vento mais carga de içamento. Conforme ilustrado, verifica-se que o maior deslocamento ocorre no sentido +Z, após aplicação dos carregamentos do 2º *load step*.

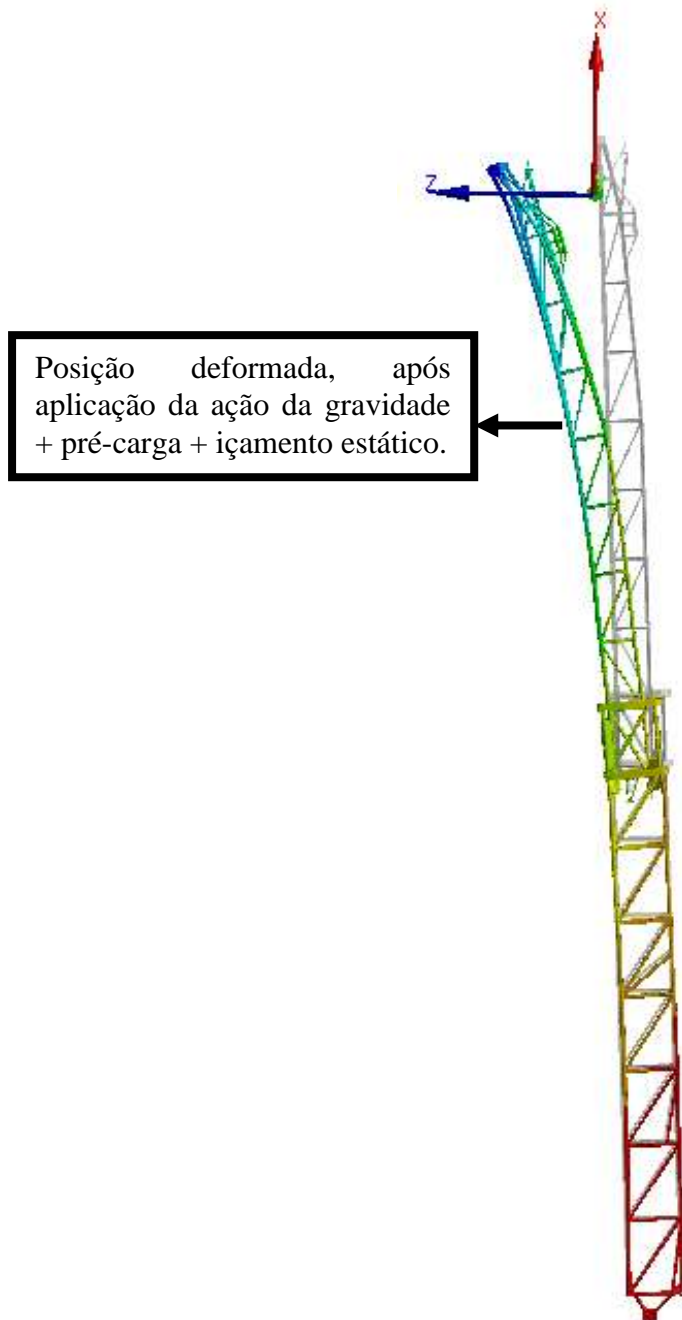


Figura F.5 – Posição da deformada após aplicação dos carregamentos do 2º *load step*

Nas tabelas a seguir são ilustrados os deslocamentos direcionais para as condições analisadas.

A Tabela F.1 ilustra os deslocamentos direcionais para hipótese A.

Tabela F.1 – Deslocamentos direcionais para hipótese A

CONDIÇÃO A				
CARREGAMENTO	DESLOCAMENTO (mm)			
	X	Y	Z	TOTAL
Pré-Carga + Gravidade	-1,34	-0,14	-16,58	16,63
Pré-Carga + Gravidade + IÇAMENTO (100 klb)	-14,03	-1,58	44,04	46,25
Pré-Carga + Gravidade + IÇAMENTO (200 klb)	-27,70	-3,70	94,25	98,31
Pré-Carga + Gravidade + IÇAMENTO (300 klb)	-42,17	-6,81	145,64	151,77

A Tabela F.2 ilustra os deslocamentos direcionais para cada condição B.

Tabela F.2 – Deslocamentos direcionais para hipótese B

CONDIÇÃO B				
CARREGAMENTO	DESLOCAMENTO (mm)			
	X	Y	Z	TOTAL
Pré-Carga + Gravidade	-1,51	-0,24	-36,65	36,68
Pré-Carga + Gravidade + IÇAMENTO (100 klb)	-14,24	-1,70	45,90	48,09
Pré-Carga + Gravidade + IÇAMENTO (200 klb)	-27,82	-4,78	95,79	99,86
Pré-Carga + Gravidade + IÇAMENTO (300 klb)	-42,39	-8,52	147,31	153,52

A Tabela F.3 ilustra os deslocamentos direcionais para hipótese C.

Tabela F.3 – Deslocamentos direcionais para hipótese C

CONDIÇÃO C				
CARREGAMENTO	DESLOCAMENTO (mm)			
	X	Y	Z	TOTAL
Pré-Carga + Gravidade	-1,34	-0,14	-16,58	16,63
Pré-Carga + Gravidade + VENTO (25knots)	-1,60	25,36	-20,11	32,41
Pré-Carga + Gravidade + VENTO (25knots) + IÇAMENTO (100 klb)	-14,05	24,72	45,58	53,72
Pré-Carga + Gravidade + IÇAMENTO (200 klb)	-27,69	27,52	96,70	104,28
Pré-Carga + Gravidade + IÇAMENTO (300 klb)	-42,08	31,43	147,37	156,45

A Tabela F.4 ilustra os deslocamentos direcionais para hipótese D.

Tabela F.4 – Deslocamentos direcionais para hipótese D

CONDIÇÃO D				
CARREGAMENTO	DESLOCAMENTO (mm)			
	X	Y	Z	TOTAL
Pré-Carga + Gravidade	-1,51	-0,24	-36,65	36,68
Pré-Carga + Gravidade + VENTO (25knots)	-1,57	8,62	-35,38	36,45
Pré-Carga + Gravidade + VENTO (25knots) + IÇAMENTO (100 klb)	-14,22	7,48	46,48	49,18
Pré-Carga + Gravidade + IÇAMENTO (200 klb)	-27,87	7,27	96,83	101,02
Pré-Carga + Gravidade + IÇAMENTO (300 klb)	-42,26	8,48	148,02	154,17

A Tabela F.5 ilustra os deslocamentos direcionais para hipótese E.

Tabela F.5 – Deslocamentos direcionais para hipótese E

CONDIÇÃO E				
CARREGAMENTO	DESLOCAMENTO (mm)			
	X	Y	Z	TOTAL
Pré-Carga + Gravidade	-1,94	0,70	-11,50	11,69
Pré-Carga + Gravidade + VENTO (40knots)	-3,62	88,86	41,01	97,94
Pré-Carga + Gravidade + VENTO (50knots)	-4,39	109,82	51,33	121,30
Pré-Carga + Gravidade + VENTO (60knots)	-5,12	130,08	60,84	143,70

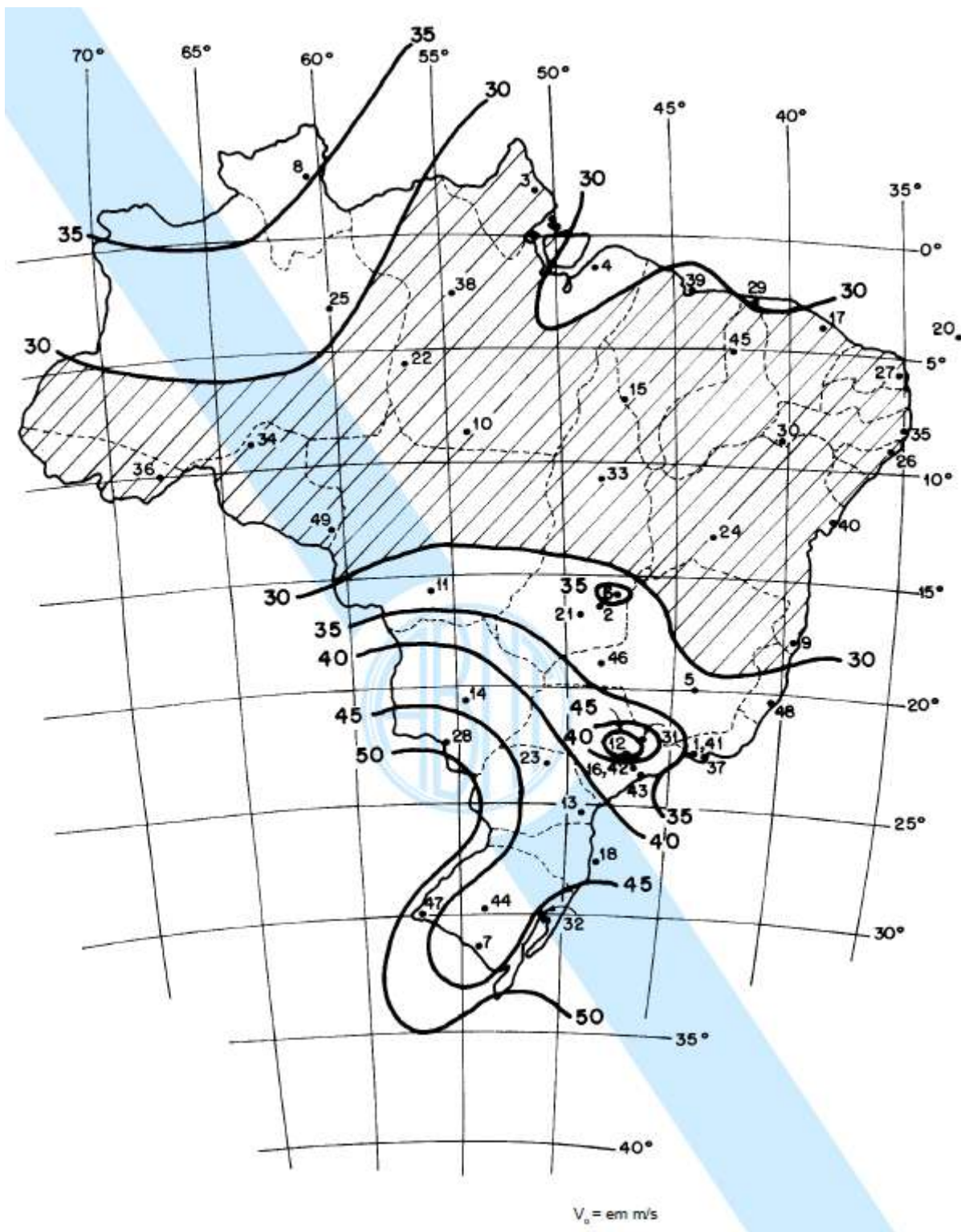
A Tabela F.6 ilustra os deslocamentos direcionais para hipótese F.

Tabela F.6 – Deslocamentos direcionais para hipótese F

CONDIÇÃO F				
CARREGAMENTO	DESLOCAMENTO (mm)			
	X	Y	Z	TOTAL
Pré-Carga + Gravidade	-1,93	0,62	15,41	15,54
Pré-Carga + Gravidade + VENTO (75knots)	-2,81	46,37	10,28	47,58
Pré-Carga + Gravidade + VENTO (60knots)	-2,98	54,68	12,74	56,22
Pré-Carga + Gravidade + VENTO (50knots)	-3,23	67,14	16,39	69,19

ANEXO A – ISOPLETAS DE VELOCIDADE BÁSICA DO VENTO
FONTE: ABNT NBR 6123:1998 - FORÇAS DEVIDAS AO VENTO EM
EDIFICAÇÕES

A velocidade básica do vento (V_0) é a velocidade de uma rajada de 3 s, excedida em média uma vez em 50 anos, a 10 m acima do terreno, em campo aberto e plano.



**ANEXO B – TESTE DE CARGA DA SONDA DE PRODUÇÃO/PERFURAÇÃO DE
POÇOS DE PETRÓLEO**

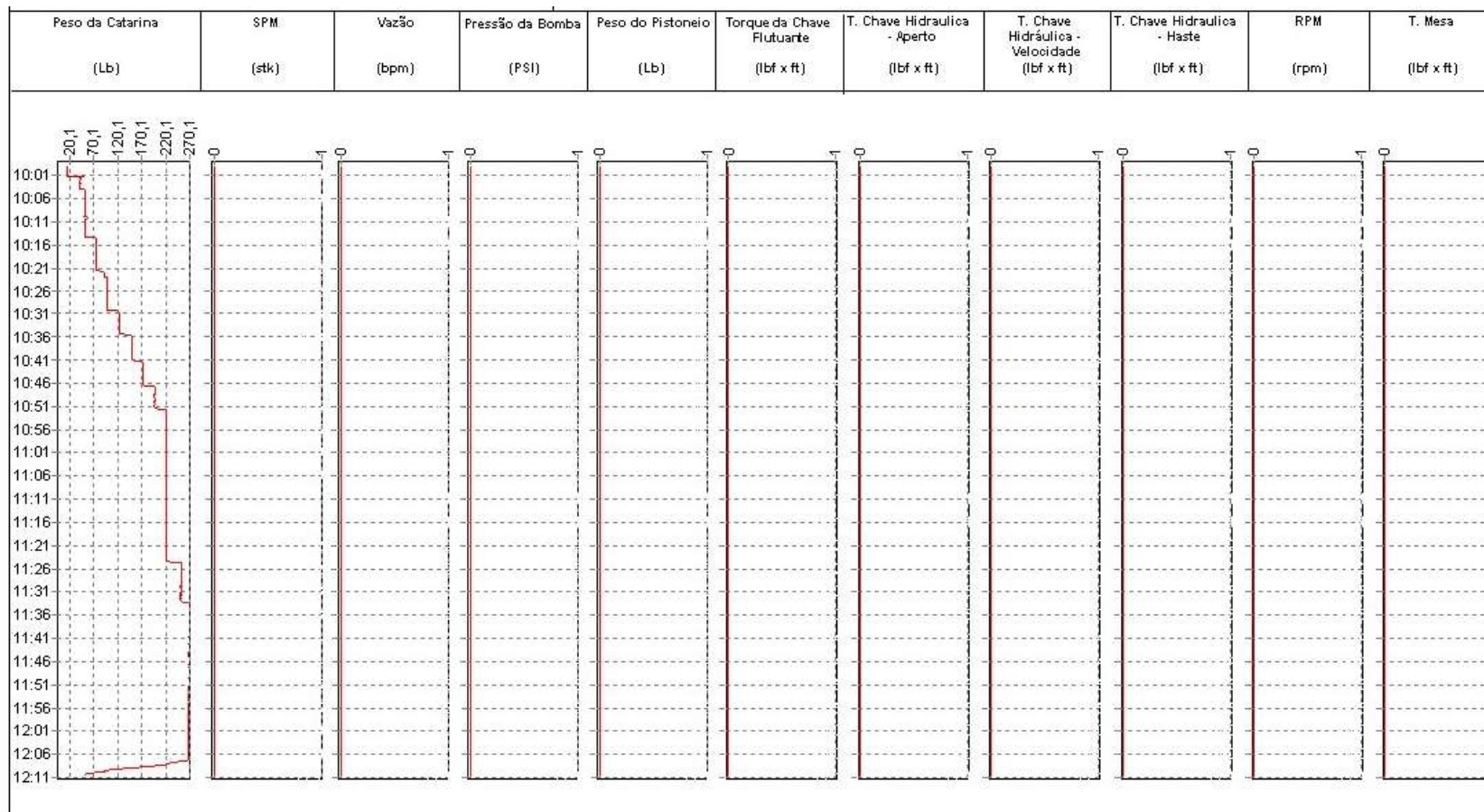


Tabela B.1 – Teste de carga de içamento estático da sonda de produção/perfuração de poços de petróleo

Conforme ilustrado na Figura B.1, verifica-se as regiões que excedem a tensão de escoamento para uma carga de içamento estático de 1201,01 kN (270 klf), estas tensões são tensões de pico e em pontos localizados, e que dificilmente ocasionará falha durante um teste de carga estática.

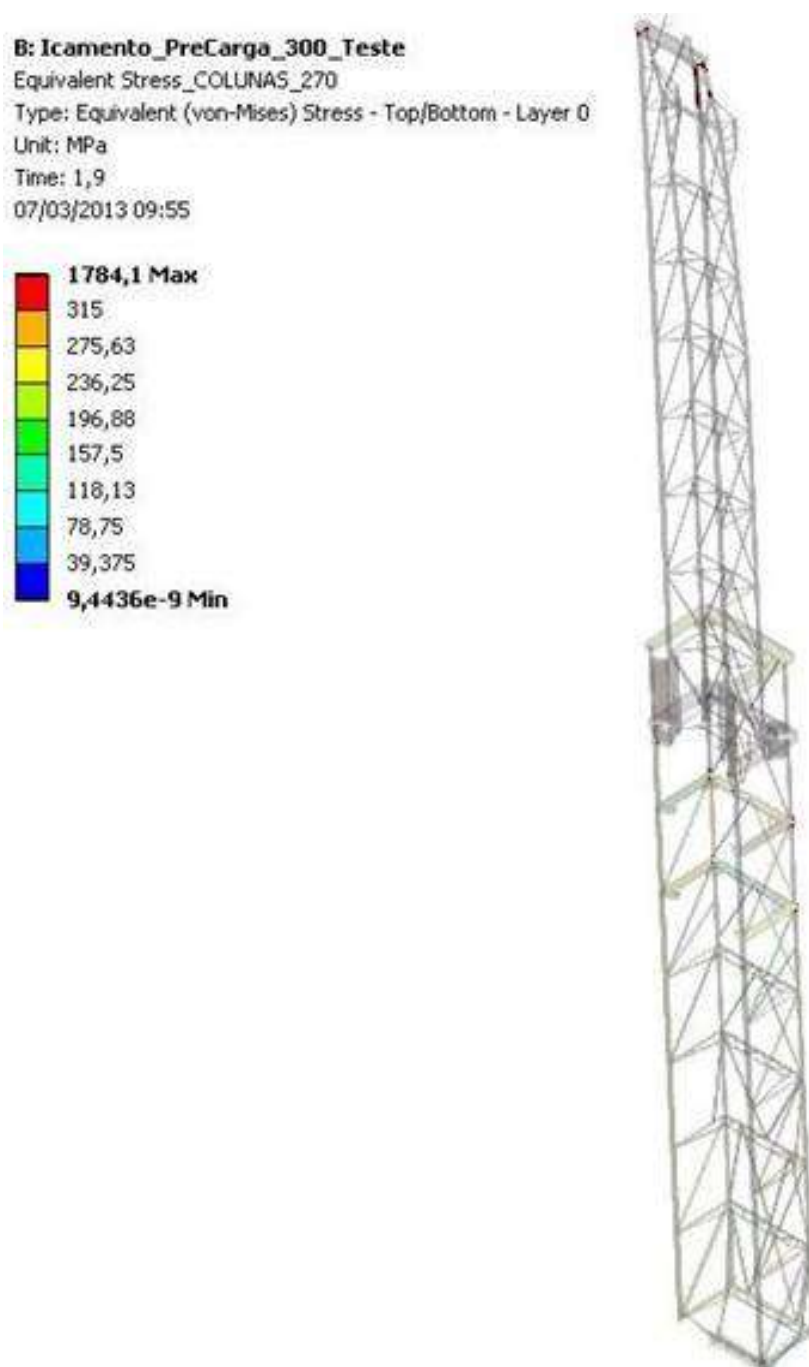


Figura B.1 – Regiões das colunas do mastro que excedem o valor da tensão de escoamento de 315 MPa para carga de içamento de 1201,01 kN (270 klf)

ANEXO C – IMAGENS DE ACIDENTES COM MASTROS
FONTE: LADS CAPÍTULO COLÔMBIA





