



ANÁLISE ESTRUTURAL EM ESTRUTURA DE MASTRO UTILIZADOS EM ATIVIDADES DE MANUTENÇÃO DE POÇO DE PETRÓLEO

DIEGO RIZZOTTO ROSSETTO

Universidade Tecnológica Federal do Paraná (UFTPR)
Departamento Acadêmico de Engenharia Mecânica (DAMEC)
Via do conhecimento, Km 01, Pato Branco – PR (Brasil)

(Recibido 22 de febrero de 2017, para publicación 27 de marzo de 2017)

Resumo – O mundo do petróleo envolve investimentos de bilhões de dólares por ano, sendo que falhas e acidentes com mastros de sondas de workover podem resultar 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, e mesmo assim, ainda não há um levantamento ou acompanhamento estatístico dos acidentes operacionais ocorridos durante a atividade de intervenção em poços de petróleo e gás. Todavia, acidentes com estes equipamentos são frequentes em campos brasileiros, porém devido à falta de uma fiscalização rígida, muitos destes acidentes são negligenciados. Este estudo tem como finalidade avaliar o comportamento estrutural do mastro da sonda de produção terrestre após alguns anos em operação de acordo com os requisitos de segurança estabelecidos pela norma API SPEC 4F-3ª edição:2008. Para isso, foi realizado um levantamento das características geométricas, dimensionais e tipos de materiais utilizados na fabricação da estrutura, a partir de um estudo de engenharia realizado em campo, para avaliar a capacidade de carga estática da estrutura do mastro adotou-se o método dos elementos finitos. Os resultados mostraram que o equipamento analisado precisa de um derating no valor do carregamento de içamento estático original de projeto para atender os requisitos de segurança estabelecidos pela norma API Spec 4F.

Palavras-chave – Elementos Finitos Aplicados em Mastros, Análise Estrutural de Mastros, Manutenção de Mastros.

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 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 (Almeida *et al.*, 2012).

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. Em março de 2007 foi publicada pela LADS Argentina a recomendação prática para verificação técnica e inspeção de mastros petrolíferos. 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.

No Brasil ainda não há 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 mais rígida, muitos destes acidentes são negligenciados.

No Brasil, atualmente, a maior parte destes equipamentos 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.

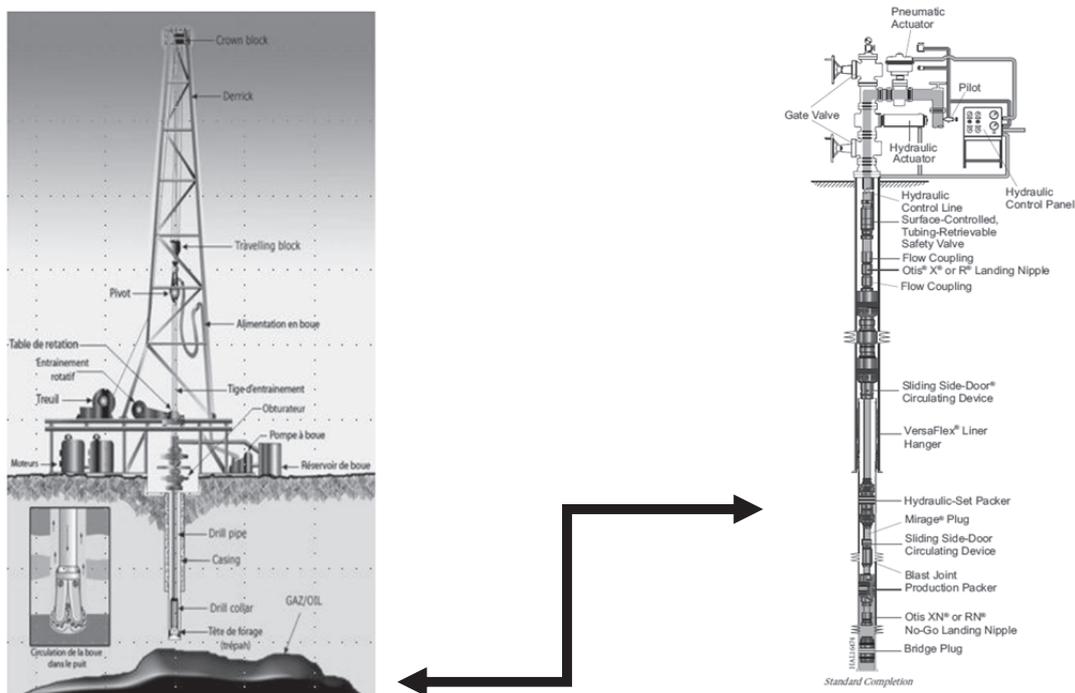


Fig. 1. Mastro de sonda de produção terrestre.
Fonte: Elaborado pelo autor.



Fig. 2. Mastro de sonda de produção terrestre.
Fonte: Elaborado pelo autor.

2. REFERENCIAL TEÓRICO

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 [Schlumberger (2013)].

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, conforme apresentado pela Fig. 1. 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.

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 está para a fundação ou base. 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.

O mastro ilustrado na Fig. 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.

Na Fig. 3 são apresentados os principais componentes que constituem o mastro de uma sonda de produção terrestre.

2.1. A norma API Spec 4F – 3^o edição: 2008

A API Spec 4F - 3^a edição: 2008 estabelece no seu escopo recomendações e requisitos apropriados para estruturas referentes às operações de perfuração e manutenção da indústria de petróleo. No item 8.1.1 a norma estabelece que a estrutura deve ser projetada e avaliada, conforme combinações de carregamentos ilustradas na tabela 1.

A referida norma também designa 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 Elásti-

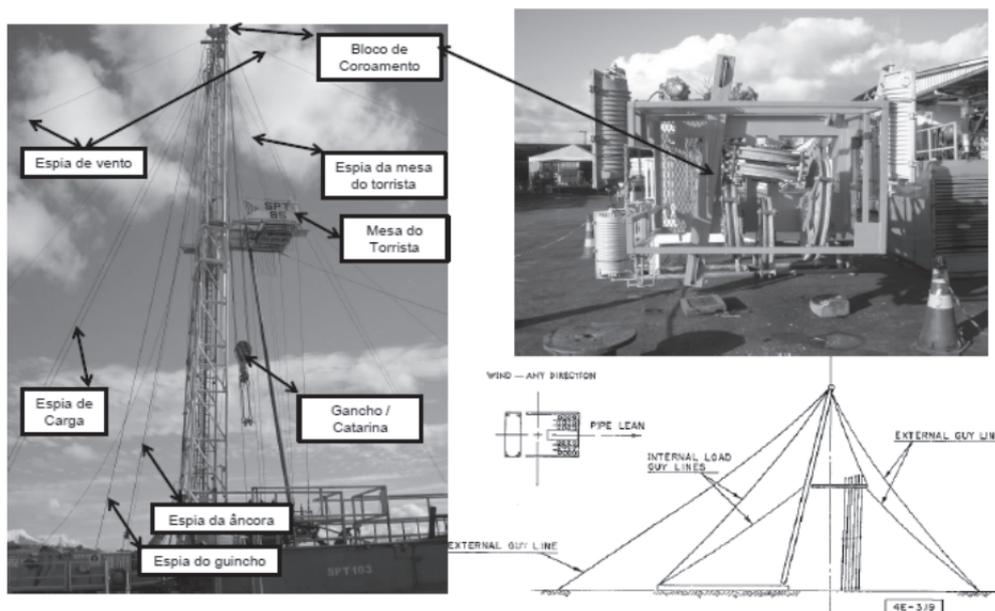


Fig. 3. Principais componentes de mastro de sonda de produção terrestre.

Fonte: Elaborado pelo autor.

Tabela 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

Fonte: Adaptado API SPEC 4F – 3º EDIÇÃO (2008)

co, deve ser utilizada para determinar as tensões admissíveis. O uso do método de Projeto Plástico não é permitido para análise deste tipo de estrutura.

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

- i. Máxima carga estática no gancho, combinados com carregamentos na linha morta *Deadline* e linha do guincho principal *Fastline*, para cada condição de içamento.
- ii. Máxima carga estática de rotação;
- iii. Máxima carga estática de estaleiramento de tubos *Setback*;
- iv. Peso próprio da estrutura montada;
- v. 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.

2.2. AISC 360-10 – Capítulo b item 4 – *design for strenght using allowable strenght design (ASD)*

O método ASD (*Allowable Strenght 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 [1].

$$R_a \leq R_n / \Omega \quad (1)$$

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.

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 Mises pode ser representada, conforme equação abaixo.

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

2.3. Elementos finitos

Segundo Alves 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 (Alves Filho, 2006). Conforme 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.

Muitas estruturas têm características geométricas, mecânicas ou de carregamento o que tornam impossível a utilizar os modelos simples como, por exemplo, os modelos de estado plano de tensão ou estado plano de deformação, modelos axissimétricos ou até mesmo os modelos placa e casca. Desta forma, a única alternativa é realizar uma análise tridimensional (Oñate, 2009). O tipo de elemento influencia diretamente no procedimento de análise de um determinado projeto. No caso específico de estruturas de mastros de sonda que é constituída de perfis tubulares estruturais pode-se modelar a estrutura por meio de elementos de casca, a fim de reduzir o tempo computacional de processamento sem acarretar em perda de precisão nos resultados.

Elementos de casca, mostrado na Fig. 4, 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, para-choques, caixa estrutural completa de ônibus, trens e aviões. A casca pode ser representada por uma superfície média, onde a mesma é a distân-

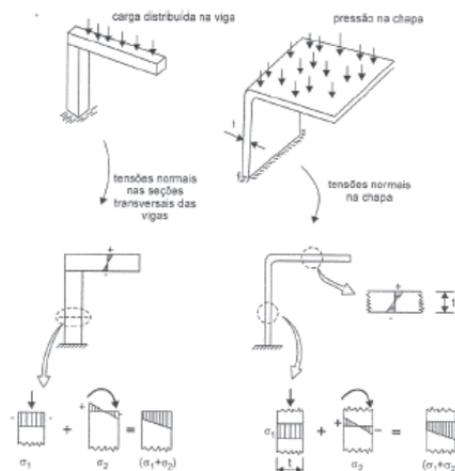


Figura 5.23 – Exemplo de Estruturas constituídas por chapas e vigas. Tensões Normais.

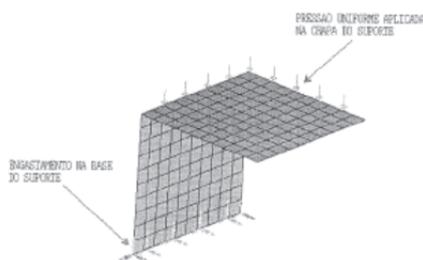


Fig. 4. Característica do elemento de casca.
Fonte: [Adaptado Filho (2006)].

cia $t/2$ em relação às superfícies internas e externas. Uma malha de casca pode sofrer esforços axiais, de flexão e torção (Cook *et al.*, 2002; Filho, 2006).

O método dos elementos finitos é largamente empregado em engenharia na análise de estruturas, em transferência de calor e escoamento de fluidos. Trata-se de uma técnica matemática auxiliada por computador para a obtenção de soluções numéricas aproximadas de um conjunto de equações aplicado a um problema físico que, quando resolvidas, predizem a resposta do sistema real quando sujeito a influências externas. O problema físico envolve, tipicamente, uma estrutura real ou um componente estrutural, sujeito a certas cargas. A idealização do problema físico para um modelo matemático requer a aplicação de certas hipóteses que levam à formulação de equações diferenciais que governam o modelo matemático. O método de elementos finitos, então, resolve esse modelo matemático (Bednar, 1986; Telles, 1996; Zienkiewicz e Taylor, V.1 e 2, 2000; Cook, 2002; Moss, 2004; Alves Filho, 2006).

A elaboração de modelos numéricos para análise de mastros de sondas com o uso da técnica dos elementos finitos requer o entendimento e um bom conhecimento dos princípios que estão na base do seu desenvolvimento e uma boa perícia na sua manipulação. Por meio dos modelos numéricos é possível obter soluções detalhadas do comportamento estrutural de geometria complexas e de difícil solução analítica (Amaral, 2008).

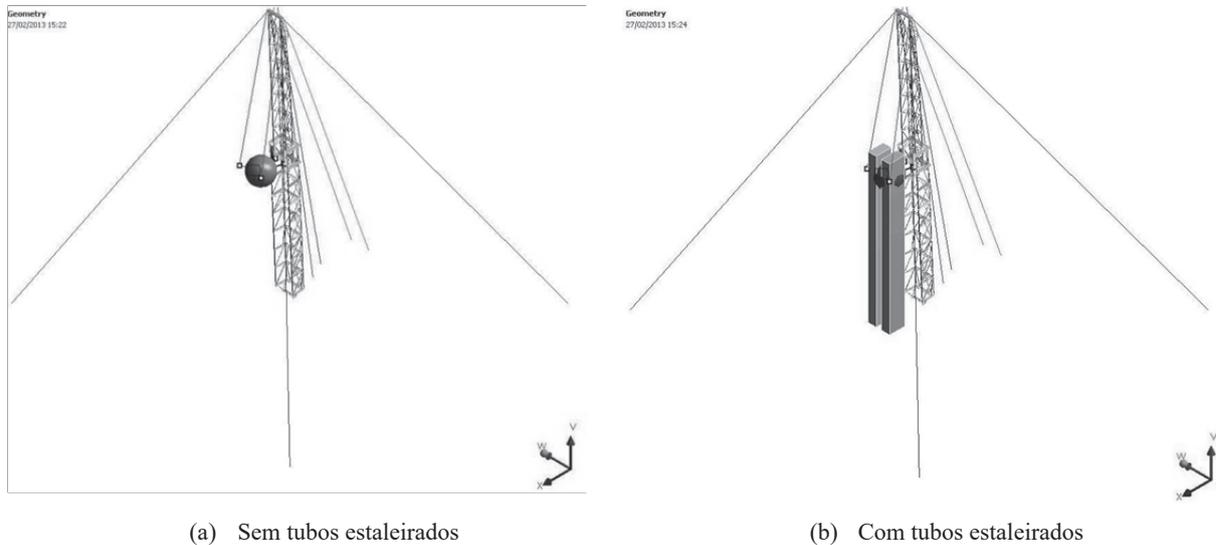
3. MATERIAIS E MÉTODOS

A sonda de produção terrestre de poços de petróleo analisada foi 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. Devido à 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 dos elementos finitos.



Fig. 5. Exemplo dos pontos de medição de espessura de parede.

Fonte: Elaborado pelo autor.



(a) Sem tubos estaleirados

(b) Com tubos estaleirados

Fig. 6. Estrutura completa da sonda sem tubos estaleirados e com tubos estaleirados.

Fonte: Elaborado pelo autor.

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. As inspeções de espessura dos tubos foram realizadas em 2 regiões, equidistantes ao longo do tubo e em 4 posições perpendiculares entre si, conforme exibido na Fig. 5.

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

3.2. Modelos em software CAD

A geometria da estrutura do mastro da sonda de produção terrestre consiste de perfis tubulares, altura de 32,92 m (108 ft) e capacidade máxima de içamento estático de 1.334.466,48 N (300.000 lbf). 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 $2,75^\circ$, mais espias de vento e mesa do operador (Torrستا). A Fig. 6, ilustra o modelo da sonda de produção terrestre sem tubos estaleirados e com tubos estaleirados.

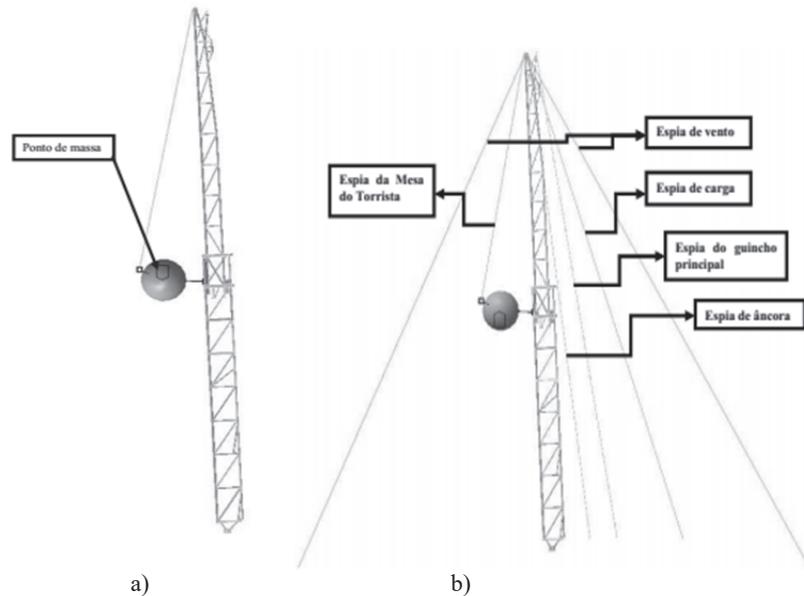


Fig. 7. Modelo simplificado da estrutura para análise pelo método dos elementos finitos.
Fonte: Elaborado pelo autor.

Tabela 1. Valores dos carregamentos de projeto da sonda de produção terrestre.

Hipótese	Condição	Tubos Estaleirados	Máxima Carga de Içamento Estático (kN) / [klbf]	Pré-carga nas Espigas 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		Não	(1334,4) / [300]	(4,448) / [1000]	
			(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		Não	(1334,4) / [300]	(4,448) / [1000]	
			(889,6) / [200]		
			(444,8) / [100]		

Fonte: Elaborado pelo autor.

A mesa do torrasta foi substituída por sua massa equivalente distribuída nos pontos de fixação da mesa na estrutura do mastro superior, conforme ilustrado na Fig. 7a. 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 espigas de vento e de carga são modeladas com elementos de viga, Fig. 7b. Tubos e chapas foram modelados em superfícies para posterior utilização de elementos de casca, conforme ilustrado na Fig. 7c.

3.3. 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. Na tabela 2, são ilustrados as condições e os valores dos carregamentos utilizados em cada hipótese avaliada.

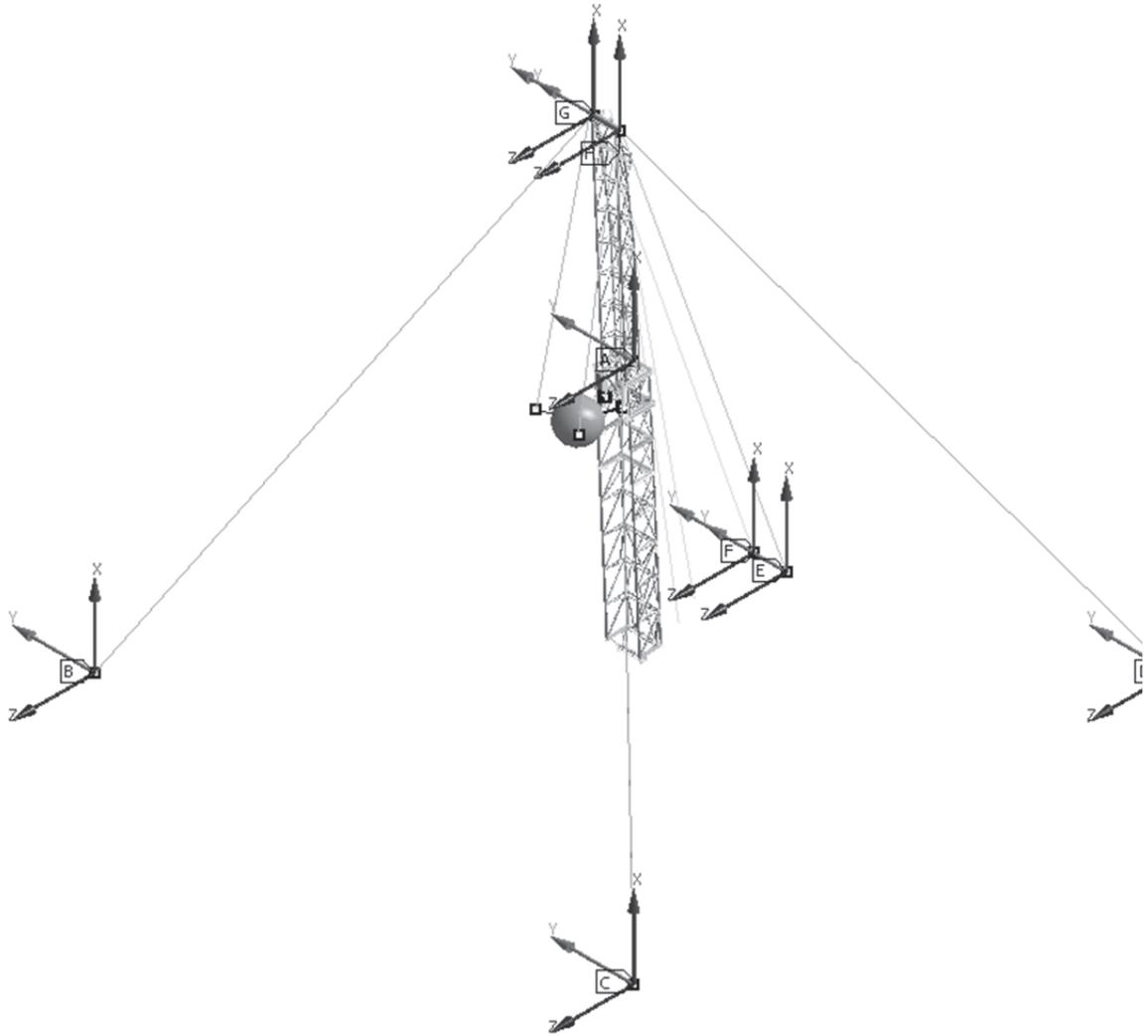


Fig. 8. Exemplo de regiões onde foram utilizadas restrições do tipo joint.
Fonte: Elaborado pelo autor.

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 C), 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.

3.4. Modelo de elementos finitos

As análises que se encontram neste estudo são lineares, para condições de contato e de materiais. Foram utilizados contatos do tipo Joints (identificado pelo sistema de coordenadas da Fig. 8). 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, conforme ilustrado na Fig. 8.

A malha é composta por elementos de viga e casca. Elementos de viga foram utilizados para modelar as espias de carga, enquanto que os elementos de cascas foram utilizados para modelar os perfis tubulares. As malhas tiveram pequenas variações entre as configurações modeladas, mas, no âmbito geral, a malha ficou com aproximadamente 357.770 nós e 345.772 elementos. A Fig. 9, ilustra a malha dos perfis tubulares da sonda de produção terrestre.



Fig. 9. Malha gerada na estrutura.
Fonte: Elaborado pelo autor.

3.5. Critério de análise

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.

As colunas são os elementos principais da análise, são manufaturas em aço ASTM A500 Grau C, com tensão de escoamento de 315 MPa, considerando um coeficiente de segurança de 1,67 a máxima tensão admissível é 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.

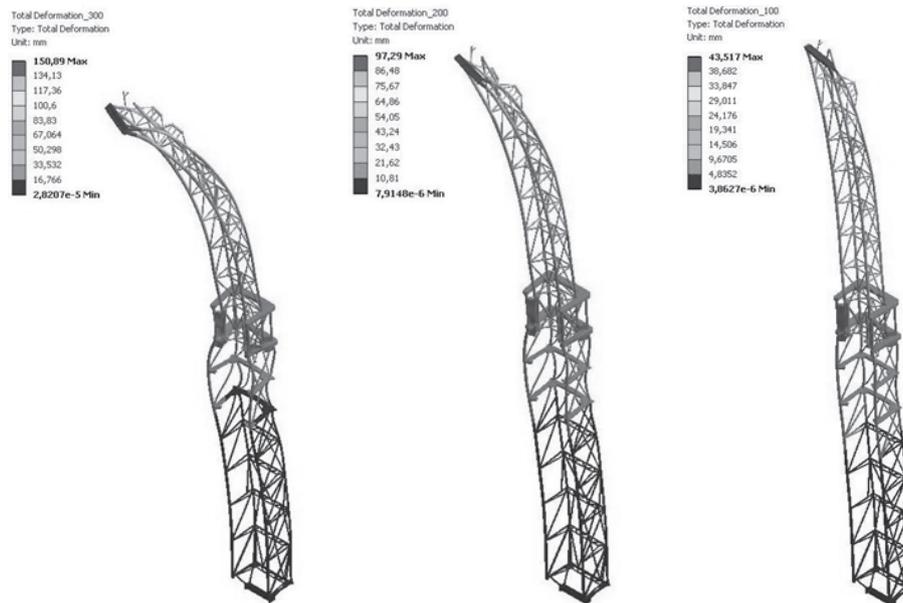
4. RESULTADOS E DISCUSSÕES

Nas seções a seguir são ilustrados os resultados do gradiente de tensões da estrutura do mastro da sonda de produção terrestre para cada condição de combinação de carregamento, conforme descrito na tabela 2, na condição de operação para as hipóteses analisadas A, B, C e D.

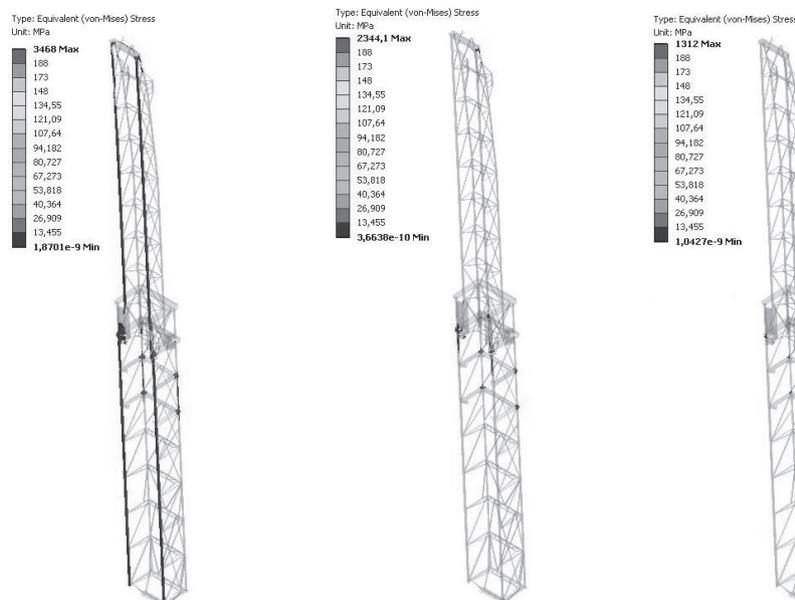
Na Fig. 10, são apresentadas a deformação total da estrutura e as regiões do mastro que excedem o limite admissível em função da variação do carregamento de içamento estático na condição de operação Hipótese A.

Conforme ilustrado nas imagens da Fig. 10, verifica-se que para valores de carregamento de içamento estático acima de 174 klbf (773,9 kN) as tensões excedem o limite de segurança admissível estabelecido pela norma API Spec 4F. Nesta hipótese o modo principal de falha da estrutura é devido à flambagem, tendo nas colunas frontais seus elementos mais críticos.

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



Regiões de tensões acima do limite admissível (em vermelho)



(a) Carregamento de 300 klbf

(b) Carregamento de 200 klbf

(c) Carregamento de 100 klbf

Fig. 10. Regiões acima do limite admissível para a hipótese A.

Na Fig. 11, são apresentadas a deformação total da estrutura e as regiões do mastro que excedem o limite admissível em função da variação do carregamento de içamento estático na condição de operação Hipótese B.

Conforme ilustrado nas imagens da Fig. 11, verifica-se que para valores de carregamento de içamento estático acima de 176 klbf (782,8 kN) as tensões excedem o limite de segurança admissível estabelecido pela norma API Spec 4F. Nesta hipótese o modo principal de falha da estrutura é devido à flambagem, tendo nas colunas frontais seus elementos mais críticos.

Na Fig. 12, são apresentadas a deformação total da estrutura e as regiões do mastro que excedem o limite admissível em função da variação do carregamento de içamento estático na condição de operação Hipótese C.

Conforme ilustrado nas imagens da Fig. 12, verifica-se que para valores de carregamento de içamento

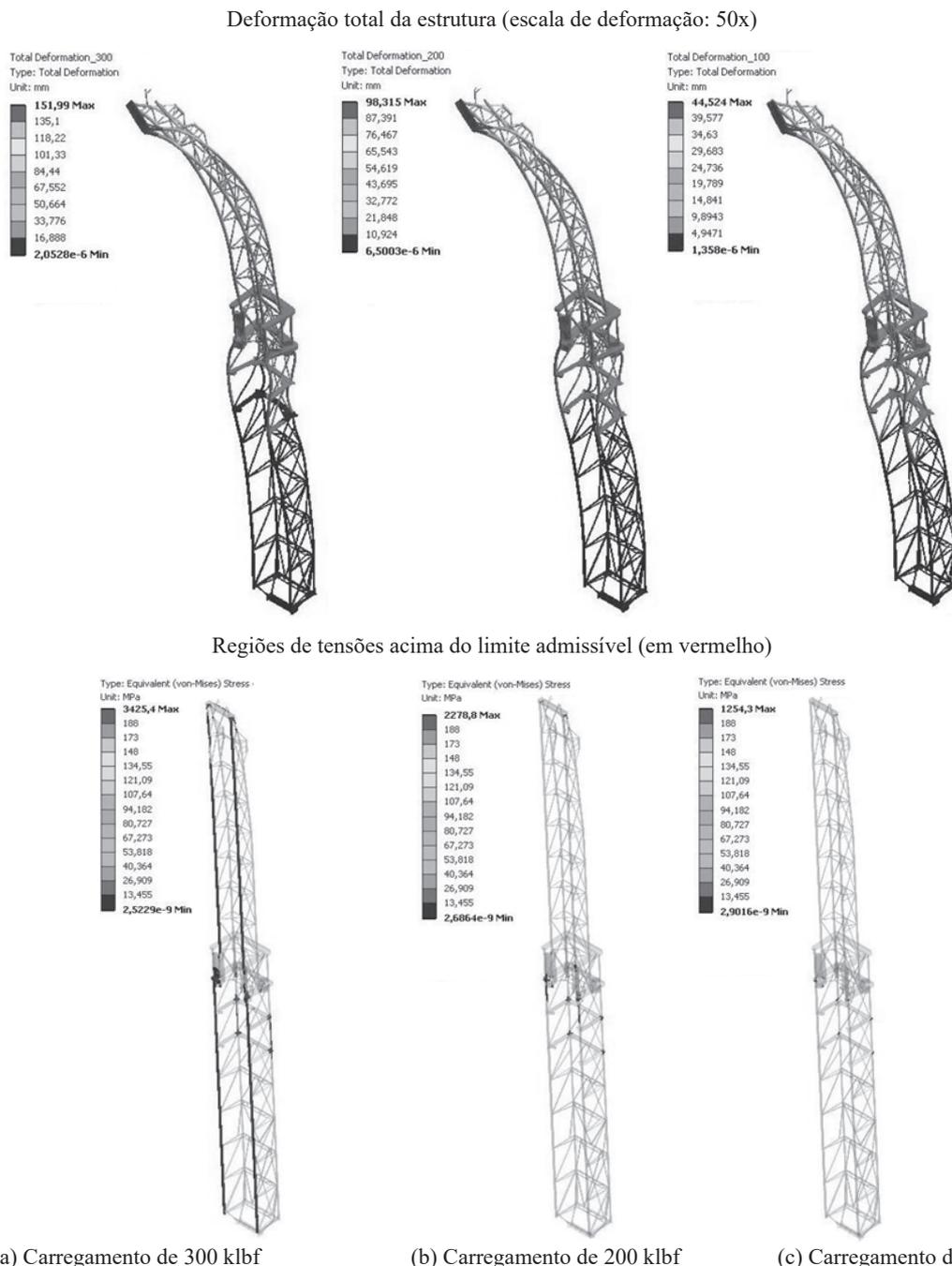


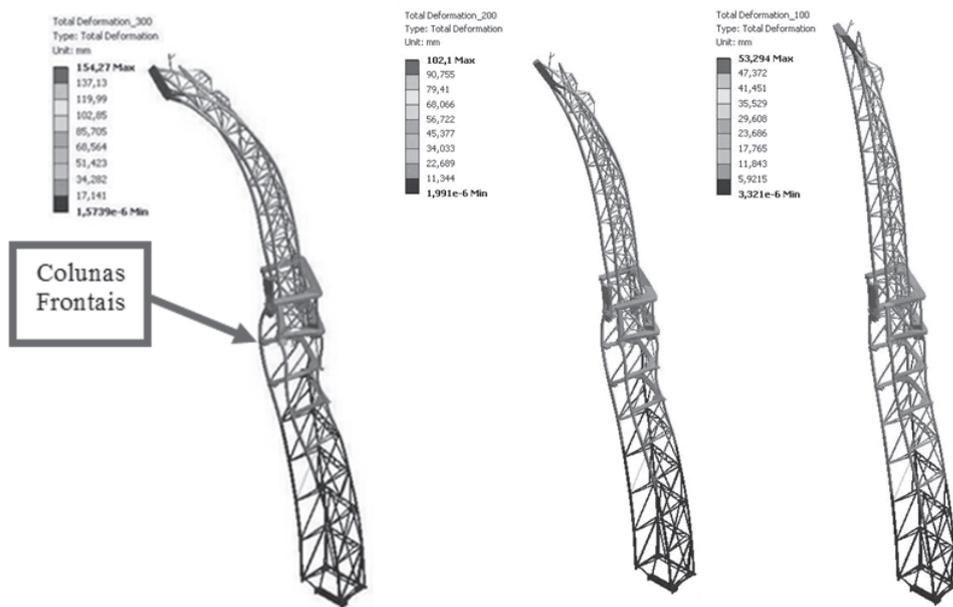
Fig. 11. Regiões acima do limite admissível para a hipótese B.

estático acima de 153 klbf (680,5 kN) as tensões excedem o limite de segurança admissível estabelecido pela norma API Spec 4F. Nesta hipótese o modo principal de falha da estrutura é devido à 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.

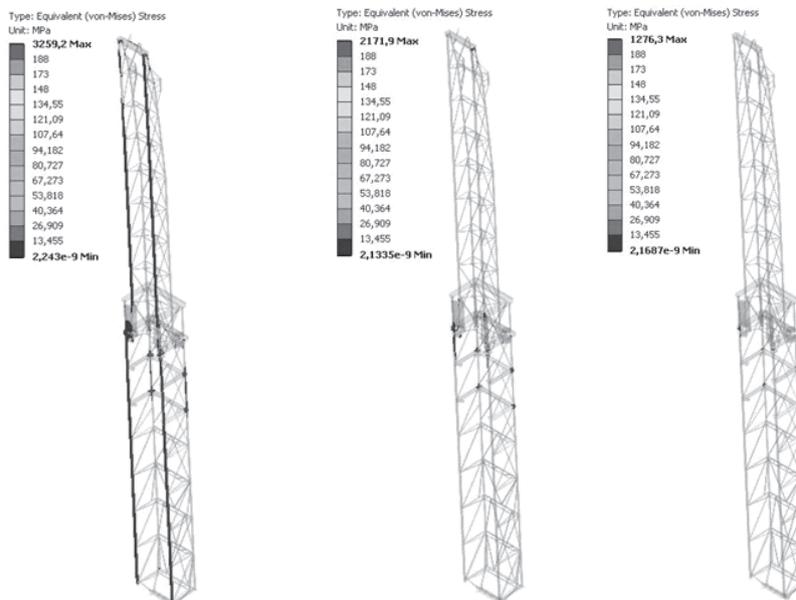
Na Fig. 13, são apresentadas a deformação total da estrutura e as regiões do mastro que excedem o limite admissível em função da variação do carregamento de içamento estático na condição de operação Hipótese D.

Conforme ilustrado nas imagens da Fig. 13, verifica-se que para valores de carregamento de içamento estático acima de 175 klbf (778,4 kN) as tensões excedem o limite de segurança admissível estabelecido pela norma API Spec 4F. Nesta hipótese 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 este modo de falha é minimizado quando a estrutura está sem os tubos estaleirados.

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



Regiões de tensões acima do limite admissível (em vermelho)



(a) Carregamento de 300 klbf

(b) Carregamento de 200 klbf

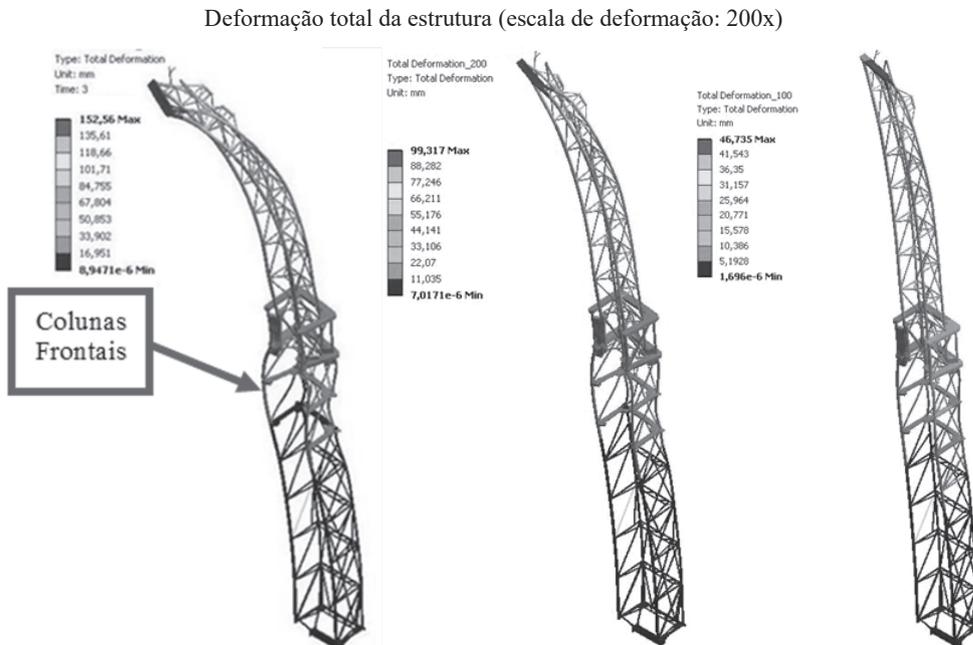
(c) Carregamento de 100 klbf

Fig. 12. Regiões acima do limite admissível para a hipótese C.

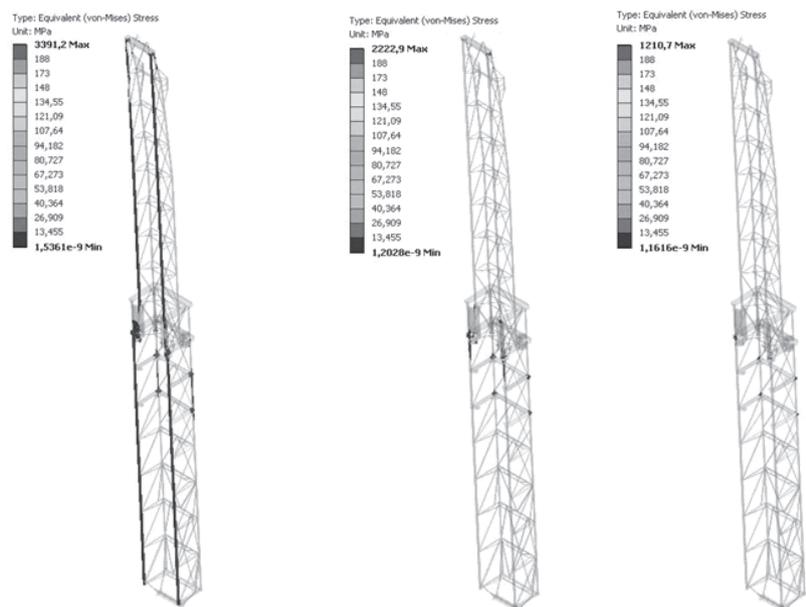
4.1. Discussões dos resultados

Os resultados mostram 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 174 klbf (773,9 kN) para vento de 0 Knots (0 m/s) e 153 klbf (680,5 kN) para vento de 25 Knots (12,86 m/s), hipóteses A e C, respectivamente.

Na condição da estrutura sem tubos estaleirados, para atender o coeficiente de segurança de 1,67, a máxima carga de içamento estático que a sonda pode ser submetida é de aproximadamente 176 klbf (782,8 kN) para vento de 0 Knots (0 m/s) e 175 klbf (778,7 kN) para vento de 25 Knots (12,86 m/s), hipóteses B e D, respectivamente.



Regiões de tensões acima do limite admissível (em vermelho)



(a) Carregamento de 300 klbf

(b) Carregamento de 200 klbf

(c) Carregamento de 100 klbf

Fig. 13. Regiões acima do limite admissível para a hipótese D.

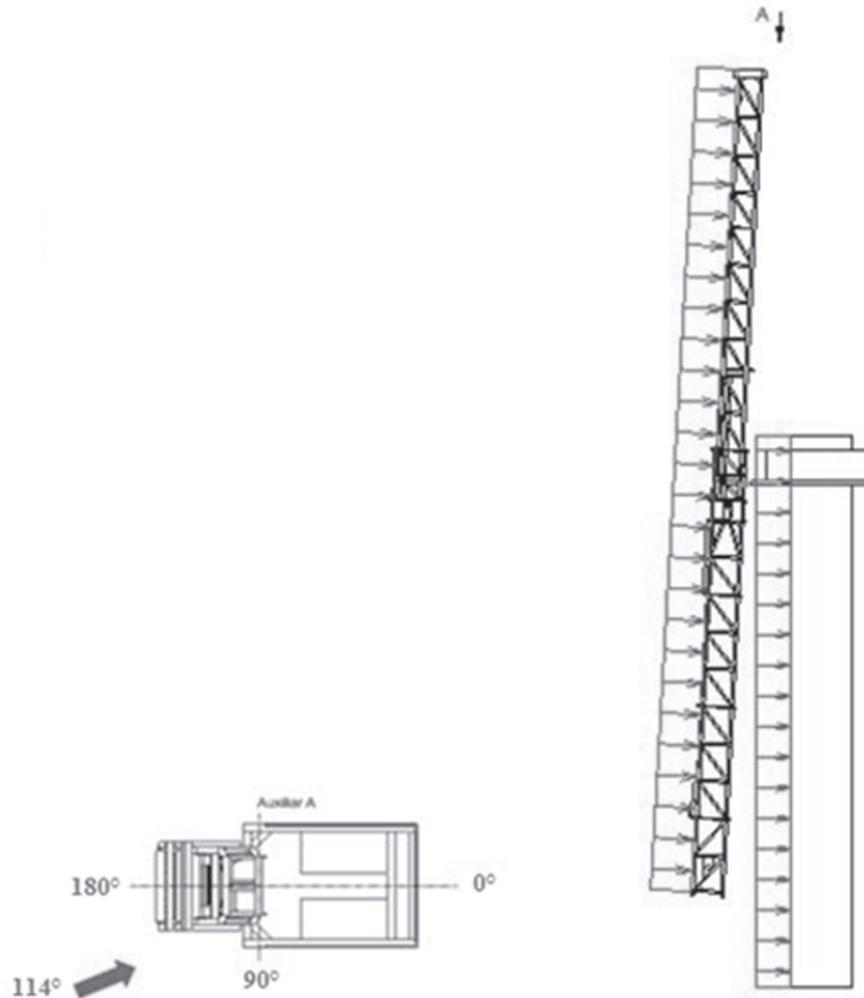


Fig. 14. Direções de vento analisada de 114°.

O decréscimo do valor de carregamento de içamento estático que o mastro com tubos estaleirados pode ser submetido é devido à carga adicional de 1931,35 lbf (8591,08 N) na direção diagonal (114°) na velocidade de vento 25 Knots (12,86 m/s) gerada pela ação do vento sobre os tubos estaleirados que estão apoiados sobre a mesa do torrasta, conforme ilustrado na Fig. 14.

A presença dos tubos estaleirados gera um efeito adicional de torção sobre a estrutura (Conforme ilustrados nas Fig. 10 a Fig. 13), este mesmo fenômeno não é verificado com tanta intensidade quando o mastro está configurado sem tubos estaleirados.

5. CONCLUSÃO

O presente estudo atendeu com êxito seu objetivo principal da elaboração pelo método de elementos finitos do modelo para avaliação das condições operacionais da estrutura de 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%. Da mesma forma, verificou-se 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.

Através dos resultados obtidos é possível avaliar o comportamento para cada condição de carregamento simples e combinado. Por fim, diante do que foi exposto, a elaboração do modelo e procedimentos para análise é necessário para o aumento de confiabilidade e condições de segurança durante a operação, bem como e proteção dos ativos das empresas responsáveis pela operação destes equipamentos.

Por meio do estudo apresentado neste trabalho para avaliação do comportamento estrutural de estruturas de mastros de sonda é possível identificar os principais parâmetros de projeto que possuem influência significativa no desempenho operacional, permitindo assim, uma avaliação detalhada dos pontos importantes para manutenção e projeto, de acordo com condições específicas de cada tipo de operação.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- [1] ABNT - Associação Brasileira de Normas Técnicas (edificações). *Forças devidas ao vento em*. Rio de Janeiro: ABNT.
- [2] ABNT - Associação Brasileira de Normas Técnicas. *NBR 6123 - Forças devidas ao vento em edificações*. Rio de Janeiro: ABNT (1998)
- [3] Almeida, A.G., Henrique, N.I., Lemos, T.S.M., “Análise dos dados divulgados pelos órgãos reguladores de segurança offshore dos eua, reino unido e noruega: perfis típicos e análise de aderência ao conceito de indicadores de desempenho de segurança”, *Rio Oil & Gas Expo and Conference* (2012)
- [4] Amaral, R.M., “Métodos computacionais em engenharia mecânica”, Dissertação (Mestrado) – Universidade Nova de Lisboa. Departamento de Engenharia Mecânica e Industrial, Monte de Caparica (2008)
- [5] American Institute of Steel Construction. ANSI/AISC 360-10: Specification for Structural Steel Buildings. Chicago, Illinois: AISC (2010).
- [6] American Petroleum Institute. 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 (2000)
- [7] American Institute Petroleum. 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 (2004)
- [8] American Petroleum Institute. API 4F: *Specification for Drilling and Well Servicing Structures*, 3ª Edição ed., Washington: API (2008)
- [9] Bednar, H.H., *Pressure vessel design handbook*. 2nd Edition, New York: Van Nostrand Reinhold (1986)
- [10] Cook, R.D., Malkus, D.S., Witt, R.J., *Concepts and Applications of Finite Element Analysis*, 4ª ed., Nova Iorque: Wiley (2002)
- [11] Filho, A.A., *Elementos Finitos: A Base da Tecnologia CAE* (4ª Edição ed.). São Paulo: Érica Ltda. (2006).
- [12] LADS - Latin America Drilling Safety. Verificación Técnica e Inspección de Mástiles Petroleros (2007)
- [13] Oñate, E., *Structural analysis with the finite element method: Linear statics*. Volume 1, Basis and Solids, (2009)
- [14] Penteadó, S.F., “Danos à imagem da BP decorrentes do acidente da plataforma deepwater horizon”, *Rio Oil & Gas Expo and Conference* (2012)
- [15] Schlumberger. Scribd. Acesso em 12 de Abril de 2013, disponível em Scribd: <http://pt.scribd.com/doc/60755868/Work-Over-Well-Control>
- [16] Moss, D.R., *Pressure vessel design: illustrated procedures for solving major pressure vessel design problems*, 3rd Edition, USA: Elsevier (2004)
- [17] Shigley, J.E., Budynas, R.G., Nisbett, J.K., *Mechanical Engineering Design*, 9th Edition, New York, McGraw-Hill (2011)
- [18] Zienkiewicz, O.C., Taylor, R.L., *The Finite Element*, Volume 1: The Basis. 5th Edition. Butterworth-Heinemann (2000)

STRUCTURAL ANALYSIS IN MAST STRUCTURE USED IN WELL SERVICING PETROLEUM

Abstract – The world petroleum involves billions of dollars by year, being that failures and accidents in structures of mast of oil wells can result in severe economic and legal consequences to companies responsible for operation of these equipments. Currently in Brazil most onshore rigs are in operation more than three decades, and even so 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 these equipments are frequents in Brazilian fields, but due absence of a rigid inspection, many of these accidents are ignored. This study has as propose evaluate the structural behavior of onshore rig mast after some years operation agreement requirements by safety established standard API SPEC 4F:3nd Edition: 2008. For this, was performed a survey of geometric, dimensional characteristics and type of material used in the structure fabrication, based on a study carried out in the field, to evaluate the static load capacity of the mast structure it was adopted the finite element methods. The results showed that rig analyzed require of the derating in original value design of the static lifting for attend the safety requirements established by standard API SPEC 4F.

Keywords – Finite Elements applied in Masts, Structural Analysis in Masts, Maintenance in Masts.

