

UNIVERSIDADE DE TAUBATÉ
José Felipe Braz

**ANÁLISE ESTRUTURAL DE UMA BASE GUIA
SUBMARINA PELO MÉTODO DOS
ELEMENTOS FINITOS**

Taubaté – SP
2011

José Felipe Braz

**ANÁLISE ESTRUTURAL DE UMA BASE GUIA
SUBMARINA PELO MÉTODO DOS
ELEMENTOS FINITOS**

Dissertação apresentada para obtenção do
Certificado de Título de Mestre pelo curso de
Mestrado Profissionalizante do Departamento
de Engenharia Mecânica da Universidade de
Taubaté,

Área de Concentração: Projeto Mecânico

Orientador: Prof. Dr. Luiz Eduardo Nicolini
do Patrocínio Nunes

**Taubaté – SP
2011**

JOSÉ FELIPE BRAZ

**ANÁLISE ESTRUTURAL DE UMA BASE GUIA SUBMARINA
PELO MÉTODO DOS ELEMENTOS FINITOS**

Dissertação apresentada para obtenção do
Certificado de Título de Mestre pelo curso de
Mestrado Profissionalizante do Departamento
de Engenharia Mecânica da Universidade de
Taubaté,
Área de Concentração: Projeto Mecânico
Orientador: Prof. Dr. Luiz Eduardo Nicolini
do Patrocínio Nunes

Data: _____

Resultado: _____

BANCA EXAMINADORA

Prof. Dr. Luiz Eduardo Nicolini do Patrocínio Nunes

Universidade de Taubaté

Assinatura _____

Profa. Dra. Valesca Alves Correa

Universidade de Taubaté

Assinatura _____

Prof. Dr. Victor Orlando Gamarra Rosado

UNESP Guaratinguetá

Assinatura _____

Dedico este trabalho aos meus pais, Márcio e Goretti,
e à minha querida esposa Ana Paula.

Ao meu orientador Luiz Eduardo, pelo apoio e
comprometimento.

AGRADECIMENTOS

À Universidade de Taubaté, pela oportunidade de continuidade de estudo e crescimento científico.

Ao Prof. Dr. Luiz Eduardo Nicolini, pela habilidade com que orientou nosso trabalho.

À minha esposa Ana Paula Alves Pereira, pela revisão ortográfica.

Ao supervisor Nelson Tadashi Assano, por disponibilizar os recursos para realização das análises.

Aos colegas da turma XX do Mestrado Profissionalizante do Departamento de Engenharia Mecânica da Universidade de Taubaté, pela amizade e por compartilhar informações.

“O fato de ser brasileiro só me enche de orgulho.”

Ayrton Senna

RESUMO

Historicamente, o sistema para instalação de equipamentos de produção submarina de petróleo por meio de cabos guia, tem sua eficiência comprovada. Porém a grande maioria dos projetos das bases guia submarinas foi calculada por métodos analíticos, que embora permitam a obtenção de respostas exatas em todos os infinitos pontos de uma estrutura, não são aplicáveis a todos os casos. Isso motivou a aplicação do método dos elementos finitos (MEF) neste trabalho, que a partir do desenvolvimento de procedimentos aproximados, pode ser aplicado independentemente da forma da estrutura e das condições de carregamento. O estudo consiste da análise estrutural do modelo tridimensional da estrutura da base guia, modelado no *software* Autodesk Inventor® e analisado no *software* ANSYS® Workbench. O estudo traz uma pesquisa diagnóstica e utiliza abordagem quantitativa e exploratória. Diferentes modelos matemáticos foram gerados para obtenção dos resultados nos pontos mais críticos da estrutura, a fim de se determinar sua resistência aos esforços de instalação e operação aplicados, levando em consideração os critérios estabelecidos nas normas DNV No. 2.7-3, API 17D 1.ed. e a tensão equivalente de von-Mises.

Palavras-chave: Análise estrutural, Método dos elementos finitos, ANSYS®, Base guia submarina.

ABSTRACT

Historically, the guideline system for installation of subsea oil production equipment has proven its efficiency. However the majority of the subsea guide base designs have been calculated by analytical methods, although they allow obtaining exact answers in all infinite points of a structure, they are not applicable to all cases. This motivated the application of the finite element analysis method (FEA) in this work, which from the development of approximate procedures can be applied regardless of the structure shape and loading conditions. This paper consists of a structural analysis of the guide base frame model, generated in Autodesk Inventor® software and analyzed in ANSYS® Workbench software. This study brings a diagnostic research using a quantitative and exploratory approach. Different mathematical models were generated to obtain the results at the most critical points of the structure in order to determine its resistance to the loads applied during installation and operation, taking into account the criteria laid down in DNV No. 2.7-3, API 17D 1st Ed. and the von-Mises equivalent stress.

Keywords: Structural analysis, Finite element analysis method, ANSYS®, Subsea guide base.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 – Tipos de unidades com referências às regras e normas para certificação.....	26
Figura 2 – Tipos de unidade.....	27
Figura 3 – Base guia permanente.....	30
Figura 4 – Sistema para completção submarina.....	31
Figura 5 – <i>Sketches</i> e sólido com <i>features</i>	34
Figura 6 – Modelo da estrutura inferior.....	37
Figura 7 – Modelo importado para o ANSYS.....	38
Figura 8 – Definição dos contatos.....	40
Figura 9 – Propriedades do aço.....	42
Figura 10 – Malha inicial.....	43
Figura 11 – Primeiro refinamento da malha.....	44
Figura 12 – Segundo refinamento da malha.....	45
Figura 13 – Terceiro refinamento da malha.....	46
Figura 14 – Quarto refinamento da malha.....	47
Figura 15 – Fixação e carga vertical.....	48
Figura 16 – Fixação e carga horizontal.....	49
Figura 17 – Tensão de von-Mises pela carga vertical no primeiro modelo.....	52
Figura 18 – Deslocamento pela carga vertical no primeiro modelo.....	53
Figura 19 – Tensão de von-Mises pela carga vertical no segundo modelo.....	54
Figura 20 – Tensão de von-Mises pela carga horizontal no segundo modelo.....	54
Figura 21 – Deslocamento pela carga vertical no segundo modelo.....	55
Figura 22 – Deslocamento pela carga horizontal no segundo modelo.....	55
Figura 23 – Tensão de von-Mises pela carga vertical no terceiro modelo.....	56
Figura 24 – Tensão de von-Mises pela carga horizontal no terceiro modelo.....	57
Figura 25 – Deslocamento pela carga vertical no terceiro modelo.....	57
Figura 26 – Deslocamento pela carga horizontal no terceiro modelo.....	58
Figura 27 – Tensão de von-Mises pela carga vertical no quarto modelo.....	59
Figura 28 – Tensão de von-Mises pela carga horizontal no quarto modelo.....	59
Figura 29 – Deslocamento pela carga vertical no quarto modelo.....	60
Figura 30 – Deslocamento pela carga horizontal no quarto modelo.....	60
Figura 31 – Tensão de von-Mises pela carga vertical no quinto modelo.....	61
Figura 32 – Tensão de von-Mises pela carga horizontal no quinto modelo.....	62

Figura 33 – Deslocamento pela carga vertical no quinto modelo.....	62
Figura 34 – Deslocamento pela carga horizontal no quinto modelo.....	63
Figura 35 – Convergência dos resultados (tensão).....	64
Figura 36 – Convergência dos resultados (deformação).....	64
Figura 37 – Fixação e carga vertical máxima.....	67
Figura 38 – Fixação e carga horizontal máxima.....	68
Figura 39 – Tensão de von-Mises pela carga vertical máxima.....	68
Figura 40 – Tensão de von-Mises pela carga horizontal máxima.....	69
Figura 41 – Deslocamento pela carga vertical máxima.....	69
Figura 42 – Deslocamento pela carga horizontal máxima.....	70

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 – Propriedades mecânicas do material.....	41
Tabela 2 – Qualidade da malha X Tensão de von-Mises.....	63
Tabela 3 – Qualidade da malha X Deformação.....	64
Tabela 4 – Comparativo de Tensões.....	66
Tabela 5 – Comparativo de Deformações.....	66
Tabela 6 – Comparativo de Tensões (máxima carga).....	70
Tabela 7 – Comparativo de Deformações (máxima carga).....	70

LISTA DE ABREVIATURAS

API	-	<i>American Petroleum Institute</i>
B-Rep	-	<i>Boundary Representation</i>
BS	-	<i>British Standard</i>
CAD	-	<i>Computer Aided Design</i>
CAE	-	<i>Computer Aided Engineering</i>
CAM	-	<i>Computer Aided Manufacturing</i>
CSG	-	<i>Constructive Solid Geometry</i>
DNV	-	<i>Det Norske Veritas</i>
EF	-	Elementos Finitos
FEA	-	<i>Finite Element Analysis</i>
FEM	-	<i>Finite Element Method</i>
MEF	-	Método dos Elementos Finitos
2D	-	Duas Dimensões
3D	-	Três Dimensões

SUMÁRIO

1.0	Introdução.....	15
1.1	Objetivos.....	16
1.1.1	Objetivos específicos.....	16
1.2	Estrutura do trabalho.....	17
2.0	Revisão da Literatura.....	18
2.1	Trabalhos Correlatos.....	18
2.2	Análise Estrutural.....	20
2.3	Histórico do MEF.....	20
2.4	O Método dos Elementos Finitos.....	21
2.4.1	Discretização do Modelo Matemático pelo MEF.....	22
2.5	A Tecnologia CAE.....	22
2.6	O Critério de von-Mises.....	23
2.7	A norma DNV.....	23
2.7.1	Tipos de unidades.....	24
2.7.2	Projeto.....	27
2.8	Norma API.....	28
2.9	Modelagem em 3D.....	31
2.9.1	Planejamento da Modelagem.....	32
2.9.2	Princípios da Modelagem.....	33
2.9.3	Restrições Geométricas.....	34
2.9.4	<i>Features</i> e o CAE.....	35
3.0	Metodologia.....	36
3.1	Geometria do modelo.....	36
3.2	Modelo de Elementos Finitos (EF).....	38
3.2.1	Conexões.....	39
3.2.2	Material.....	41
3.2.3	Malha.....	42
3.2.4	Cargas e condições de contorno.....	47
3.2.5	Solução.....	49

4.0 Resultados.....	51
4.1 Solução dos modelos de EF.....	51
4.2 Cálculo dos valores admissíveis.....	65
4.3 Cálculo das cargas máximas admissíveis.....	66
5.0 Conclusões e Sugestões para trabalhos futuros.....	72
6.0 Referências.....	74
ANEXOS.....	77

1.0 Introdução

Na exploração submarina de petróleo são empregados os mais diversos tipos de equipamentos, técnicas operacionais e de instalação, que são determinadas caso a caso, dependendo das condições para operação de um campo de produção de petróleo.

No caso específico dos equipamentos de produção, um dos fatores determinantes nessa escolha é a profundidade ou lâmina d'água em que os equipamentos irão operar. Em profundidades por volta de 1500 ft, aproximadamente 460 m, o sistema de cabos guia conhecido como sistema *guideline*, é amplamente utilizado para descida dos equipamentos de produção e completação.

Este sistema tem sua eficiência comprovada em campo e constitui-se basicamente de quatro cabos que se estendem verticalmente da plataforma até o poço de petróleo, onde são fixados aos postes de uma base guia submarina que tem sua estrutura central presa a um conjunto de tubos denominado cabeça-de-poço.

De acordo com a API 17D (*American Petroleum Institute*, 1992), além de prover a orientação necessária, a base guia também estará sujeita aos esforços decorrentes da instalação, e irá suportar os esforços da operação de produção por toda a vida do equipamento.

A principal finalidade do cálculo estrutural na engenharia é garantir que os equipamentos sejam projetados de forma que não estejam sujeitos a falhas provocadas pelas diversas condições de carregamento a que serão expostos durante a sua vida operacional.

Embora os métodos analíticos clássicos de cálculo permitam a obtenção de respostas exatas em todos os infinitos pontos de uma estrutura, não é sempre possível aplicá-los devido ao fato destas soluções serem conhecidas apenas para alguns casos e geometrias não muito complexas. Frente a essa enorme restrição é que surgiu o método de elementos finitos, que a partir do desenvolvimento de procedimentos aproximados pode ser aplicado independentemente da forma de uma estrutura e das condições de carregamento (Filho, 2007).

De forma geral, o método de elementos finitos pode ser definido como um método matemático no qual uma estrutura contínua é subdividida em um número finito de elementos, conectados entre si por pontos discretos ou nós. Esses elementos são descritos por equações algébricas que formam modelos matemáticos resolvidos por intermédio de matrizes para obtenção dos resultados desejados. Levando-se em consideração que o número de pontos

discretos escolhidos seja suficiente para representar o meio inteiro da estrutura de forma aproximada (Filho, 2007; Lotti, 2006).

1.1 Objetivos

Este trabalho tem como objetivo apresentar uma análise pelo método de elementos finitos da estrutura inferior de uma base guia submarina e determinar sua resistência aos esforços aplicados durante a instalação e operação do equipamento. Motivado pelo fato de a grande maioria das bases guia terem sido calculadas por métodos analíticos, o que forçava a muitas simplificações.

Para isso foram utilizadas ferramentas computacionais de engenharia com recursos gráficos que auxiliam o entendimento dos resultados, os softwares Autodesk Inventor® e ANSYS® (Kanarachos e Demosthenous, 2006).

1.1.1 Objetivos específicos

Para atingir o objetivo principal deste trabalho é necessário alcançar os seguintes objetivos específicos, e nesta seqüência:

- ✓ Gerar modelo em 3D da estrutura inferior da base guia;
- ✓ Demonstrar como a geração de malha mais refinada nos pontos críticos do modelo conduzem a convergência dos resultados;
- ✓ Apresentar resultados por meio da análise de elementos finitos, coerentes e em conformidade com as exigências normativas;

1.2 Estrutura do trabalho

O capítulo 1 apresenta uma introdução do assunto, justifica a utilização do objeto de estudo no campo e aborda conceitos importantes sobre a exploração submarina de petróleo e do método de análise por elementos finitos. Também cita o objetivo principal do trabalho e os objetivos específicos que estruturam a dissertação.

No capítulo 2 faz-se uma revisão da literatura que dá embasamento teórico a respeito do método de análise por elementos finitos, do critério de von-Mises, das exigências normativas e da utilização de recursos de CAD em 3D.

O terceiro capítulo mostra os métodos científicos aplicados e os recursos empregados para a execução dos experimentos.

Já o capítulo 4 trata dos resultados obtidos por meio da análise de elementos finitos e os compara com os valores estabelecidos pelas normas vigentes.

Por fim, no capítulo 5 apresentam-se as conclusões sobre as técnicas aplicadas que validam os resultados obtidos, bem como faz sugestões para trabalhos futuros.

2.0 Revisão da Literatura

Neste capítulo faz-se uma revisão da literatura, que fornece o embasamento teórico no que tange o método dos elementos finitos, sua história e aplicabilidade por meio da tecnologia CAE. Também trata do critério de tensão de von-Mises, utilizado para representar os resultados, e das abordagens e exigências da norma DNV No. 2.7-3 (*Det Norske Veritas*, 2006), dos conceitos da norma API 17D (*American Petroleum Institute*, 1992), além de apresentar alguns tópicos relevantes sobre a modelagem em 3D.

2.1 Trabalhos Correlatos

Doudoumis (2007) desenvolveu modelos de elementos finitos para analisar o comportamento de estruturas internas de reforço em construções por meio de duas abordagens: a primeira com micromodelos baseados na representação de cada painel de reforço com fina malha de elementos finitos e a segunda por macromodelos baseados no entendimento físico de cada painel de reforço como um todo, usualmente representado como um único elemento estrutural (equivalente a um modelo de um elemento finito apenas). Os micromodelos são uma abordagem mais precisa por levarem em consideração as condições de contato, várias leis dos materiais para a estrutura e os reforços (elasticidade, comportamento elastoplástico, fratura e etc.) entre muitos outros parâmetros de modelagem, além de que suas respostas tendem a ser cada vez mais precisas à medida que a discretização da malha se torna mais refinada.

Apesar de na maioria dos casos a precisão dos resultados aumentarem junto com a densidade da malha do modelo de EF, Doudoumis (2007) conclui que um excessivo aumento do refinamento da malha pode aumentar o tamanho do problema numérico sem um aumento substancial de precisão. E que neste estudo, os resultados expressaram maior precisão dos valores máximos de tensão em pequenas áreas próximas às quinas que sofrem compressão na interface da estrutura com os reforços.

Shiradhonkar e Shrikhande (2011) realizaram um estudo para detecção de danos causados por abalos sísmicos a estruturas de aço e concreto em construções, utilizando o método dos elementos finitos, e verificaram que as diferenças encontradas entre as respostas esperadas experimentalmente e analiticamente se deviam principalmente a considerações incorretas durante a modelagem das condições de contorno.

Coda (2009), ao propor uma formulação para solução pelo MEF de estruturas em 3D com não-linearidade geométrica, percebeu que a diferença relativa entre os resultados de deslocamento para as malhas fina e grossa não variou significativamente. E que ao refinar ainda mais a malha no modelo da estrutura em questão, obteve variação de 0,25% para o deslocamento, o que caracterizou a convergência. Portanto, concluiu que para os resultados de deslocamento a malha grosseira (*coarse*) estava satisfatória e que a malha fina (*fine*) seria aplicada para obter valores de tensões.

Charney e Pathak (2008) estudaram os meios de deformação elástica em estruturas de aço tridimensionais por meio de análise pelo método dos elementos finitos. Devido à necessidade de malhas de EF muito refinadas, eles modelaram apenas um oitavo desta estrutura, composta por vigas de perfil “I”, representando, assim, apenas a região de interesse que posteriormente foi comparado com os resultados do conjunto completo da estrutura para validação. Nas análises de ambos os modelos foi considerado módulo de Young de 29.000 ksi e coeficiente de Poisson de 0,3.

Farrokhi, Danesha e Eshghi (2009) propuseram modificações a estruturas de aço dúctil com o objetivo de aumentar sua resistência a momentos, utilizando uma abordagem numérica (MEF) e experimental. Durante as simulações, eles notaram grande concentração de tensão na raiz da solda de união das vigas da estrutura. Então, propuseram que a mais eficiente solução para isso deveria ser por meio da diminuição de tal concentração, reduzindo-se a seção da viga ou dos elementos de conexão. Com a redução de seção, houve uma concentração de tensão maior na viga do que na região da solda.

De Mattos *et al.* (2008) adotou o métodos dos elementos finitos para a modelagem numérica, por meio do programa ANSYS versão 8.1, para o cálculo de tensões de um cilindro para armazenamento de GNV. A análise foi focada em um trecho da região cilíndrica do vaso de pressão em estudo, visando à avaliação da camada de reforço em compósito.

O critério de falha aplicado por De Mattos *et al.* (2008) ao selante metálico foi o escoamento através da tensão equivalente pelo critério de von-Mises. Ao final da análise, a tensão equivalente de von-Mises obtida numericamente não ultrapassou limite de escoamento

mínimo requerido para o selante metálico, e conclui-se que a falha não ocorreu visto que não haverá escoamento.

Khedmati, Ghavami e Rastani (2007) realizaram um estudo comparativo do comportamento e ductilidade de placas enrijecidas em três diferentes métodos de construção e também utilizaram o critério de von-Mises em relação a tensão de escoamento para as análise EF.

2.2 Análise Estrutural

Na engenharia, o cálculo estrutural tem como primordial objetivo assegurar que uma estrutura ou equipamento que está sendo analisado não estará sujeita a falhas durante sua vida útil, sob o efeito das mais diversas condições de operação. Os recursos utilizados para tanto são geralmente obtidos a partir dos princípios de Resistência dos Materiais como resistência e rigidez de elementos estruturais e, na maioria dos casos, no estudo da Estática (Fillho, 2007). Embora os métodos analíticos clássicos de cálculo permitam a obtenção de respostas exatas em todos os infinitos pontos de uma estrutura, não é sempre possível aplicá-los devido ao fato de estas soluções serem conhecidas apenas para alguns casos (Fillho, 2007).

2.3 Histórico do MEF

O início do desenvolvimento do Método dos Elementos Finitos (MEF) ocorreu no final do século XVIII, quando fora proposto por Gauss a utilização de funções de aproximação aplicadas à solução de problemas matemáticos (Oliveira, 2000). Por mais de um século foram desenvolvidas, por diversos matemáticos, teorias e técnicas analíticas para a solução de problemas, porém pouco se evoluiu por causa da dificuldade e da limitação que havia na época para o processamento de equações algébricas (Gallagher, 1975). O desenvolvimento prático deste método ocorreu apenas muitos anos mais tarde devido aos

avanços tecnológicos, por volta de 1950, com o advento da computação. Isto permitiu a elaboração e a resolução de sistemas de equações complexas (Gallagher, 1975). Em 1956, Turner, Clough, Martins e Topp, trabalhando em um projeto de aeronaves para a Boeing, propuseram um método de análise estrutural, similar ao método de elementos finitos. Mais tarde, em 1960, estes autores utilizaram pela primeira vez o nome de Método dos Elementos Finitos, descrevendo-o. A partir de então, seu desenvolvimento foi exponencial, sendo aplicado em diversas áreas da Engenharia e áreas afins (Oliveira, 2000).

2.4 O Método dos Elementos Finitos

O problema estrutural elástico é a representação de um sistema submetido a ações externas, com uma configuração deformada resultante definida por um campo de deslocamentos e um estado interno de deformações. As ações externas são equilibradas por um estado interno de tensões. E, para a solução deste problema, recorre-se à simulação numérica, com a definição de um modelo matemático e de um procedimento numérico de análise e solução. Dentre os métodos numéricos de solução está o Método dos Elementos Finitos (Zienkiewicz e Taylor, 2000).

O modelo matemático que representa um problema estrutural é um problema de valor inicial e de contorno, composto por um sistema de equações diferenciais parciais, um conjunto de condições de contorno no espaço e condições iniciais no tempo. As equações diferenciais parciais compreendem as equações de equilíbrio entre cargas externas e tensões, as relações cinemáticas entre deformações e deslocamentos e as equações constitutivas do material, ou seja, tensões x deformações (Menezes, 2007).

O procedimento de solução pelo Método dos Elementos Finitos é idêntico ao empregado na técnica da análise matricial de estruturas reticuladas. Não há diferença em termos de implementação computacional. Estes métodos se distinguem em termos conceituais, pela definição da matriz de rigidez do elemento, seguindo os enfoques físico ou variacional. O enfoque variacional do MEF fornece um procedimento sistemático e geral para obter a matriz de rigidez de um determinado tipo de elemento e tem aplicação geral e em problemas contínuos (Menezes, 2007).

2.4.1 Discretização do Modelo Matemático pelo MEF

Para um sistema contínuo, o número de incógnitas do modelo matemático é infinito, e a solução analítica se torna inviável para problemas reais, tornando necessária sua representação através de um sistema discreto aproximado do Método dos Elementos Finitos. Para a transformação do modelo matemático contínuo em um modelo numérico discreto, o processo de discretização do MEF divide o contínuo em um conjunto de elementos, conectados por um número finito de pontos nodais ou nós (Azevedo, 2003).

A formulação deste método segue o enfoque variacional, no qual a energia potencial total de um sistema contínuo é expressa pela soma da energia interna de deformação e do trabalho das cargas externas, e essa expressão corresponde ao funcional do sistema de energia potencial. As parcelas da energia interna de deformação e do trabalho das cargas externas são representadas por integrais e são funções contínuas. Os elementos finitos são empregados para a discretização destas parcelas e obtenção das equações de equilíbrio matriciais de cada elemento (Zienkiewicz e Taylor, 2000).

2.5 A Tecnologia CAE

Antigamente não se podia contar com recursos computacionais tão evoluídos como os de hoje e os recursos de computação gráfica, como a chamada Tecnologia CAE (*Computer Aided Engineering*) e FEM (*Finite Element Method*), eram extremamente limitados. Entretanto, com o advento da computação, os recursos de computação gráfica, como a Tecnologia CAE, estão atualmente disponíveis para a engenharia e são amplamente utilizados na aplicação do Método dos Elementos Finitos. Hoje, é possível encontrar no mercado diversos programas capazes de simular estruturas extremamente complexas em pouco tempo (Azevedo, 2003).

2.6 O Critério de von-Mises

A teoria de von-Mises é a que melhor representa o comportamento dos materiais dúcteis quando da utilização do Método de Elementos finitos.

Beer, Johnston e Dewolf (2006) definem o critério de von-Mises, ou critério da máxima energia de distorção, baseando-se na determinação da energia de distorção de um certo material, ou seja, da energia relacionada com mudanças na forma do material, em oposição à energia relacionada com mudanças de volume nesse material. O critério leva este nome devido ao especialista em matemática aplicada Richard von Mises (1883-1953). Por esse critério, um componente estrutural estará em condições de segurança enquanto o maior valor de energia em distorção por unidade de volume do material permanecer abaixo da energia de distorção por unidade de volume necessária para provocar o escoamento no corpo de prova de mesmo material submetido a ensaios de tração.

2.7 A norma DNV

A DNV (*Det Norske Veritas*) é uma fundação autônoma e independente com os objetivos de preservação da vida, dos bens e do meio-ambiente, tanto em operações no mar (*offshore*) quanto terrestres (*onshore*). A DNV encarrega-se de classificar e certificar, além de prestar serviços de consultoria relacionados à qualidade de navios, unidades e instalações *offshore*, indústrias *onshore* por todo o mundo, e também desenvolve pesquisas relacionadas com estas funções.

As normas para certificação são publicações que contêm princípios, critérios de aceitação e informações práticas relacionadas com as considerações da sociedade para bens, pessoal, organização, serviço e operações. Estas normas também se aplicam como base para emissão de certificados e/ou declarações da possível não necessidade de se estar relacionado com esta classificação.

A experiência tem mostrado que a norma para certificação No. 2.7-1 “*Offshore Containers*” está sendo cada vez mais utilizada pela indústria nos tempos atuais. Por

consequência desta crescente demanda, os clientes da DNV clamaram a necessidade de se certificar unidades móveis *offshore*, que não possuem o mesmo formato e características dos *containers*, de acordo com a norma de certificação No. 2.7-1.

Como resultado desta demanda de mercado, uma nova norma de certificação No. 2.7-3 foi desenvolvida, a qual cobre todos os tipos de unidades portáteis *offshore*, diferentes dos *containers*. A DNV acredita seguramente que esta nova norma irá atender as necessidades dos clientes para estes serviços e ao mesmo tempo contribuir para expansão da aplicação da DNV deste segmento.

2.7.1 Tipos de unidades

A DNV No. 2.7-3 (*Det Norske Veritas*, 2006) foi organizada em grupos de quatro tipos de unidades, denominadas: tipo A, B, C e D.

Um esquema para o auxílio da identificação pode ser observado na figura 1, que tem por objetivo organizar os requerimentos para os diferentes tipos de unidades que normalmente caem fora das definições estabelecidas para *offshore containers* como tanques, máquinas, unidades de serviço para instalações permanentes e módulos com peso total maior do que 50 toneladas.

Tipo A são arranjos que possuem uma estrutura de base e outra lateral de proteção contra impactos. Isto é uma unidade com peso e outras características que se encaixam fora das limitações da norma para certificação 2.7-1. Estas unidades são tipicamente aplicadas a equipamentos de serviço com bombas, unidades de geração de energia, bobinas de tubos, *manifolds* montados em estruturas, vasos de pressão ou equipamentos para processamento de natureza móvel.

Tipo B são bases estruturadas para qual sua finalidade não requer a presença de uma estrutura lateral para proteção. Este tipo pode conter o mesmo tipo de função principal que o mencionado para as unidades do tipo A. A razão para omitir a estrutura de proteção lateral pode ser relacionada com o tamanho ou formato da unidade ou por outras considerações.

Tipo C são unidades que não possuam estruturas dedicadas tipicamente para transporte. Este tipo de arranjo pode possuir estruturas de suporte tais como pés, saias ou

pontos de suporte integrados a sua própria estrutura. Exemplos deste tipo de unidade são árvores de natal, rodas, *manifolds*, vasos de pressão com ferramentas, bases guia submarina e etc.

Tipo D são principalmente caixas ou unidades projetadas segundo a teoria de cascas, onde a aplicabilidade para o transporte se dá por meio de um arranjo no casco através de fixações de reforços para atingir a adequada integridade estrutural. Estes tipos de unidade normalmente dependem da resistência de seu casco resistir às cargas geradas durante o seu transporte. Exemplos deste tipo de unidade seriam cabines de controle ou módulos menores para diferenciados serviços.

Segundo os esquemas das figuras 1 e 2 pode-se definir os tipos de unidades, fazendo também referência às regras e normas que possam ser aplicadas ao equipamento cuja intenção seja transportá-lo.

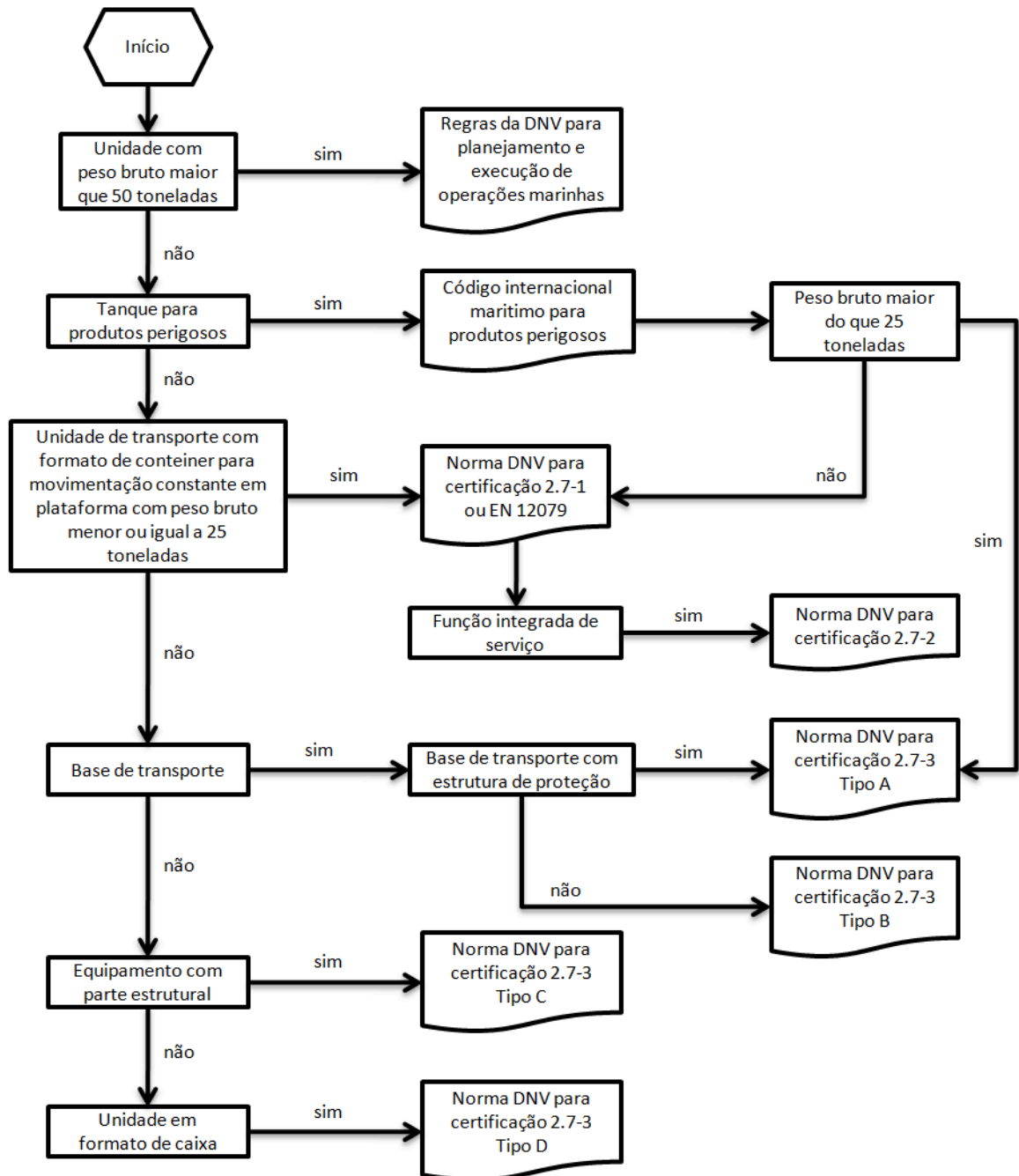


Figura 1 – Tipos de unidades com referências as regras e normas para certificação.

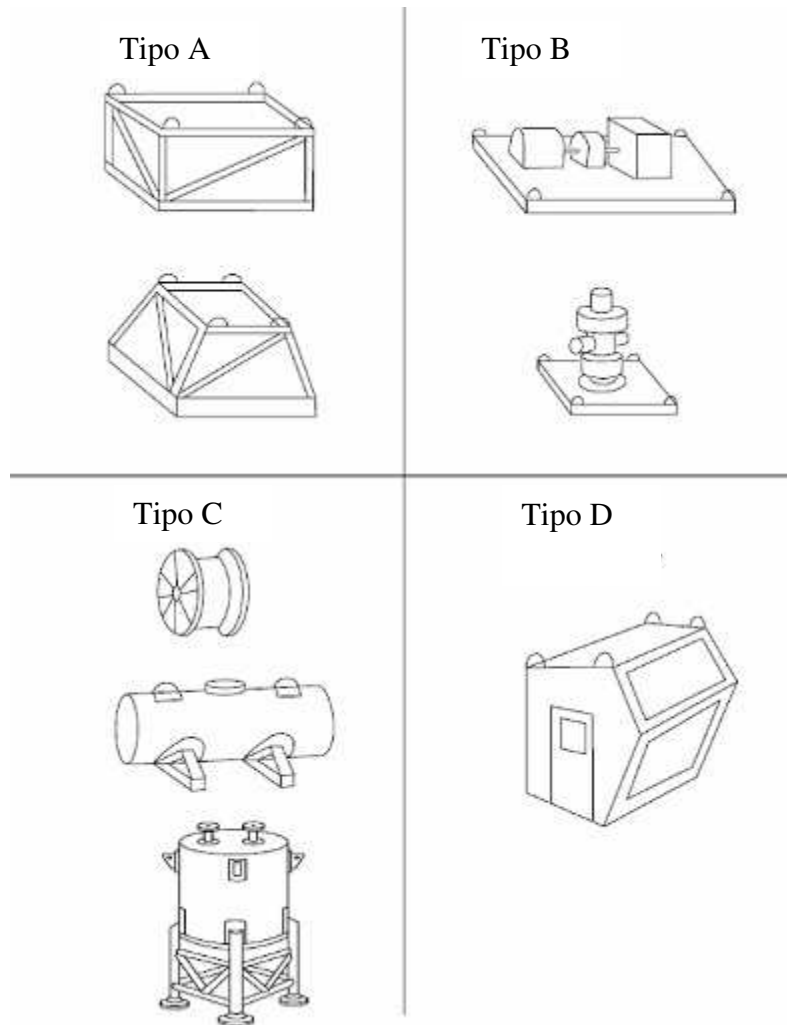


Figura 2 – Tipos de unidades.

2.7.2 Projeto

Segundo a DNV No. 2.7-3 (*Det Norske Veritas*, 2006), os procedimentos utilizados para a verificação da resistência estrutural de um equipamento devem ser definidos pelo fabricante. Assume-se que o procedimento de cálculo cobre detalhes críticos de uma maneira aceitável e capaz de representar o carregamento por toda a estrutura.

Apenas a estrutura primária deve ser incluída na análise. A resistência dos componentes da estrutura pode ser calculada por meio de cálculos manuais, análise em 3D de vigas ou por modelagem pelo método dos elementos finitos.

Os carregamentos aos quais a estrutura será submetida não devem produzir tensão equivalente de von-Mises, s_e , que exceda:

$$s_e = 0,85 \times C$$

Para os materiais normalmente utilizados, C é definido abaixo como sendo a mínima tensão de escoamento a temperatura ambiente. Outros materiais devem ser aprovados após considerações especiais.

$$\text{Para o aço: } C = R_e$$

De acordo com a DNV No. 2.7-3 (*Det Norske Veritas*, 2006), a máxima deflexão calculada não deve ser maior que:

$$y = L_n / 250$$

Onde y corresponde à deflexão e L_n é igual à distância total da quina do poste, estrutura lateral ou canto da parede que está sendo considerada. Ou seja, é o maior vão livre e/ou completa distância lateral na estrutura de uma unidade.

2.8 Norma API

As especificações da API (*American Petroleum Institute*) são publicadas para auxiliar a aquisição de materiais e equipamentos normatizados, assim como para instruir os fabricantes de equipamentos e materiais cobertos pela especificação API.

A especificação 17D foi formulada em 1992 pelo comitê de normatização do departamento de produção da API para sistemas submarinos de produção com o intuito de viabilizar a segurança, o dimensionamento e a funcionabilidade e intercambiabilidade dos equipamentos submarinos de cabeça de poço, *mudline* e árvore utilizados para a produção de petróleo e gás.

A seguir apresentam-se algumas definições de equipamentos relevantes segundo a API 17D (*American Petroleum Institute*, 1992):

Conductor Housing (alojamento de condução): O topo do primeiro revestimento de uma série que forma a fundação básica da cabeça de poço e permite a fixação da base guia.

Guideliness Systems (sistemas sem cabo guia): Sistemas que não dependem do estabelecimento de cabos guia desde o solo marinho até a plataforma na superfície para guiar e alinhar a descida dos equipamentos durante a instalação, operação, intervenção ou remoção.

Guidelines (cabos guia): Linhas esticadas desde o solo marinho até a superfície como o propósito de guiar equipamentos para a estrutura do solo marinho.

Permanent Guidebase (base guia permanente): Estrutura que estabelece alinhamento e orientação do sistema de cabeça de poço e prove uma entrada guiada para instalação de equipamentos dentro ou no conjunto da cabeça de poço.

Tree Guide Frame (estrutura guia da árvore): Estrutura da árvore que prove guia para sua instalação na cabeça de poço. Também prove suporte às linhas de fluxo e equipamentos de conexão, módulos de controle, anodos de proteção e contrapesos.

E abaixo seguem outras definições importantes segundo o glossário da *Oil & Gas Field Technical Terms*:

Completion (completação): se refere à instalação de equipamentos permanentes para produção de petróleo e gás.

Christmas Tree (árvore de natal): é um equipamento composto por blocos de válvulas conectados ao topo da cabeça de poço para controle do fluxo de petróleo e gás produzidos pelo poço.

A figura 3 a seguir mostra o arranjo e o dimensionamento de uma base guia permanente segundo a API 17D (*American Petroleum Institute*, 1992). Já a figura 4 mostra um sistema para completação submarina incluindo a árvore de produção e os tipos de carregamentos a que os equipamentos podem estar submetidos.

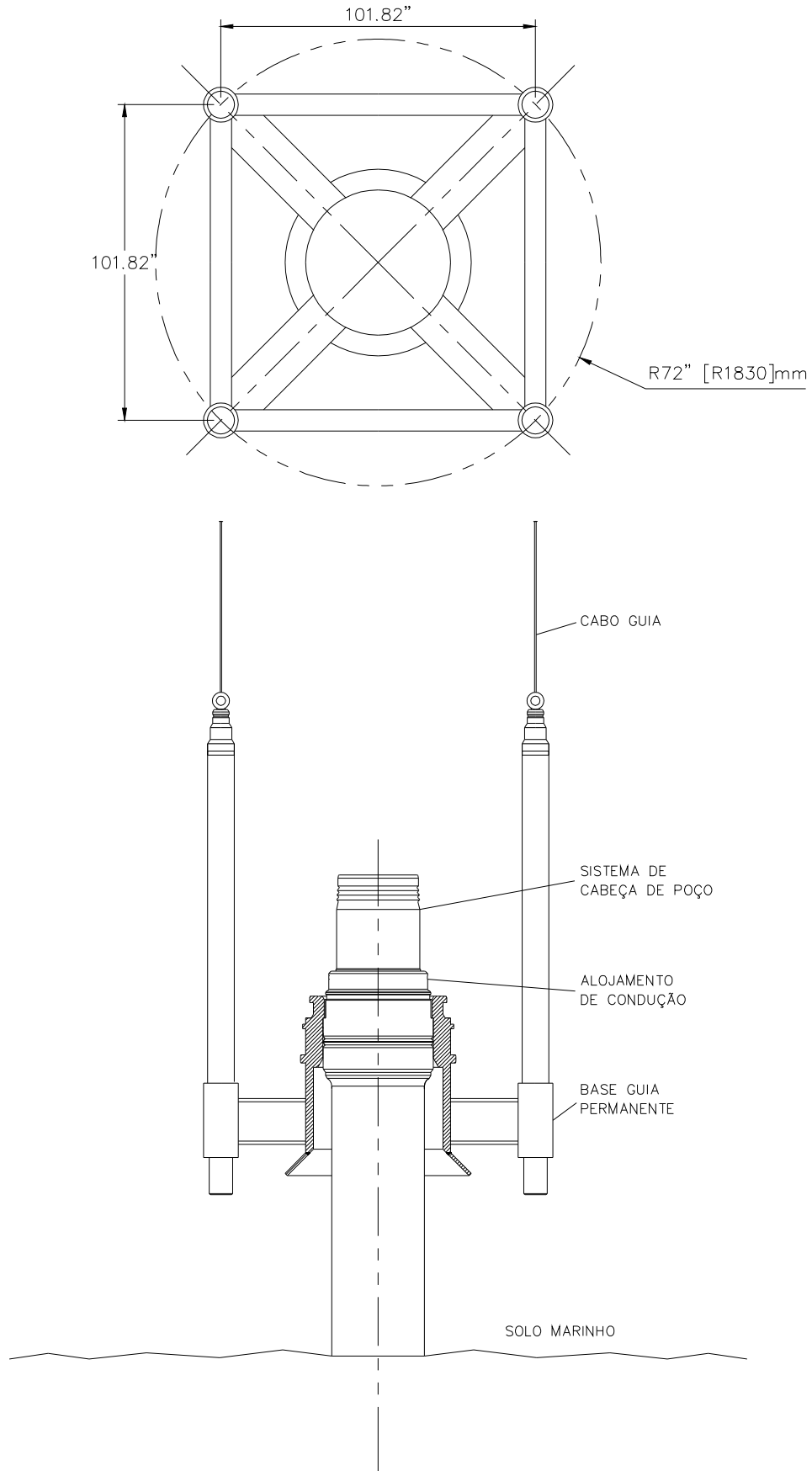


Figura 3 – Base guia permanente.

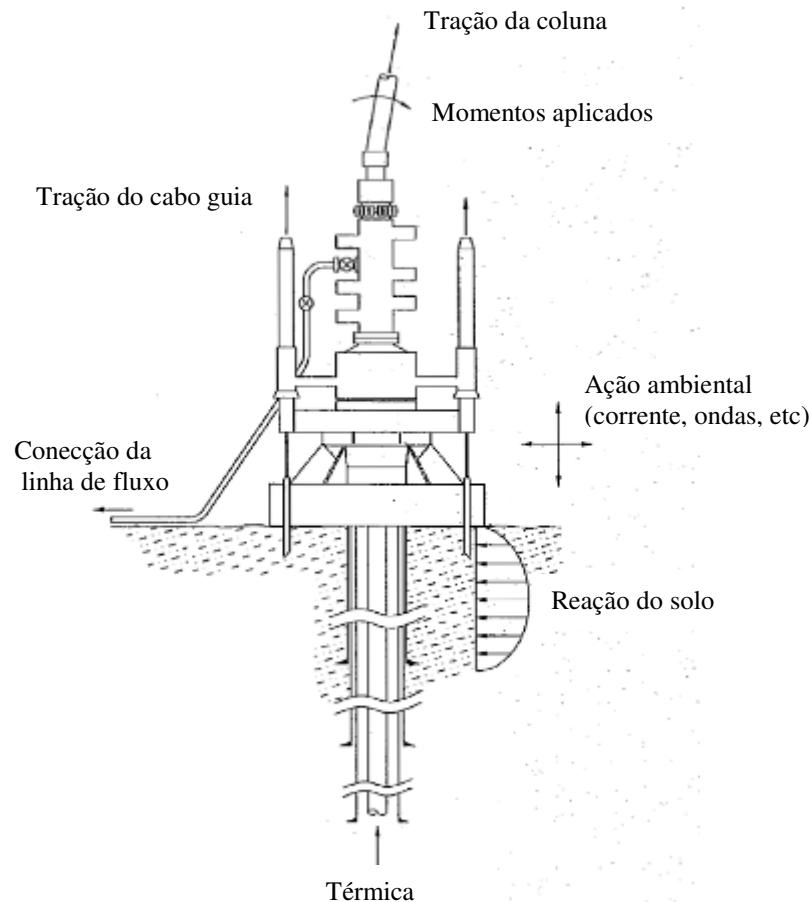


Figura 4 – Sistema para completção submarina.

2.9 Modelagem em 3D

Segundo Foggiatto *et al.* (2007), o tempo despendido durante a fase de projeto e de desenvolvimento de produtos diminuiu drasticamente nos últimos anos por consequência da aplicação de ferramentas computacionais para esse fim. E uma das ferramentas que tem contribuído para esse desenvolvimento são as ferramentas de CAD (*Computer Aided Design*), de modelagem em três dimensões, que permitem a geração de modelos que fielmente representam as características geométricas de um objeto. Além desta importante característica, essa ferramenta permite a integração com ferramentas de CAE (*Computer Aided Engineering*) e de CAM (*Computer Aided Manufacturing*).

A modelagem por sólidos é realizada a partir de formas simples bidimensionais como polígonos, círculos ou a combinação destes. Dependendo da geometria desejada, o sólido pode ser gerado fazendo-se a forma bidimensional percorrer uma trajetória ou ainda pela conexão de duas ou mais destas formas, desenhadas em planos diferentes. Para a modelagem de sólidos mais complexos, é possível a utilização de comandos baseados em operações booleanas como união, subtração e interseção. A modelagem sólida não armazena só a geometria do objeto final, mas também todas as formas primitivas e operações usadas para a sua construção (Foggiatto *et al.*, 2007). Zeid (2005) ainda define um modelo sólido como uma representação completa, única e livre de ambiguidades.

Existem vários métodos de modelagem sólida, sendo que os principais são: CSG (*Constructive Solid Geometry*), B-Rep (*Boundary Representation*), Híbrida, por *Features* e Paramétrica. A maioria dos sistemas de CAD-3D atuais incorporou em seus núcleos os métodos de modelagem por *features* e paramétrica. As *features* (características) podem ser definidas como elementos físicos das peças que tem algum significado para a engenharia. Segundo Speck (2005), a modelagem sólida paramétrica permite a geração de modelos com dimensões vinculadas às variáveis, permitindo a regeneração automática do modelo após cada modificação.

2.9.1 Planejamento da Modelagem

Segundo Alves (2002), uma das principais formas de se obter um modelo versátil é o prévio planejamento de sua modelagem. A escolha da *feature* base inicial, a seqüência das demais *features*, a criação de planos, curvas e/ou pontos de referência e o seu posicionamento adequado devem ser realizados segundo determinados critérios.

No estabelecimento de critérios para a modelagem é importante prever as aplicações futuras do modelo, como na manufatura, na montagem, nas simulações do comportamento mecânico, entre outras. No planejamento visando à manufatura, deve-se considerar o processo que será utilizado para a fabricação da peça durante a construção do modelo 3D. Desta forma, podem-se antecipar possíveis problemas na fabricação e corrigir a geometria da peça para solucioná-los.

Já para o planejamento em que se visa à montagem de modelos a fim de se obter um conjunto, devem ser previstas referências que possibilitem a montagem e os movimentos relativos dos componentes. Depois que a montagem é realizada, é possível ter uma visão de todo o conjunto, com possibilidade de simular o movimento relativo entre as peças e verificar possíveis interferências. Quando necessário simular o comportamento mecânico da peça ou conjunto é importante que *features* como arredondamentos e chanfros possam ser suprimidos sem afetar o restante da geometria. Isto permite a geração de modelos de análise mais simples e, conseqüentemente, uma economia no tempo de processamento.

2.9.2 Princípios da Modelagem

Os programas de modelagem normalmente iniciam o arquivo de uma nova peça apresentando três planos principais: XY, YZ e XZ. Ao longo da modelagem, as *features* devem ser criadas com referências nestes planos, mesmo quando houver a possibilidade de referência em outras *features* existentes. Desta forma, a flexibilidade para as modificações será maior, permitindo a supressão ou remoção de detalhes da geometria sem interferir nas demais. Em geometrias simétricas, Alves (2002) recomenda posicionar os seus planos ou eixos de simetria nos planos principais, caso contrário, devem ser escolhidos planos representativos da peça coincidentes com os planos principais. Uma alternativa, para quando os planos principais não puderem ser utilizados para referenciar alguma *feature*, é criar planos auxiliares paralelos, perpendiculares ou inclinados aos principais.

A primeira *feature* ou *feature* de base deve ser escolhida como a mais simples possível. Na maioria das vezes, quando não é possível referenciar as *features* seguintes nos planos principais ou auxiliares, é recomendável que estas sejam referenciadas na primeira *feature*. Foggiatto *et al.* (2007) alega que, desta forma, são criadas relações de parentesco, dificultando uma eventual necessidade de modificação, exclusão ou supressão, sem comprometer o restante da modelagem. Escolhendo-se sólidos básicos, como cilindros ou paralelepípedos, para iniciar uma nova peça, é possível minimizar o efeito destas relações, visto que as modificações nestas geometrias são mais simples. Deve-se, também, ter o cuidado de escolher uma geometria simples, que tenha alguma similaridade com a forma final

do modelo 3D e que seja posicionada nos planos de referência numa disposição tal, que permita a visualização do maior número de detalhes da peça.

De acordo com Speck (2005), os sólidos normalmente são gerados a partir de um *sketch*, ou seja, a partir de geometrias em 2D e é bastante comum e intuitivo, para os usuários iniciantes, construir *sketches* (esboços) com o maior nível de detalhamento possível. Este procedimento deve ser evitado, pois dificulta as futuras modificações. É muito mais produtivo trabalhar com *features* geradas a partir de formas geométricas simples como círculos e retângulos do que com geometrias bidimensionais complexas. Isto é justificado pelo fato de a maioria dos programas terem regras bastante rígidas para os *sketches*, não permitindo a conclusão desta fase enquanto existirem inconsistências na geometria. A figura 5 apresenta dois *sketches*, um complexo (a), um simples (b) e um sólido completo (c) com *features* de arredondamento, furos e chanfros.

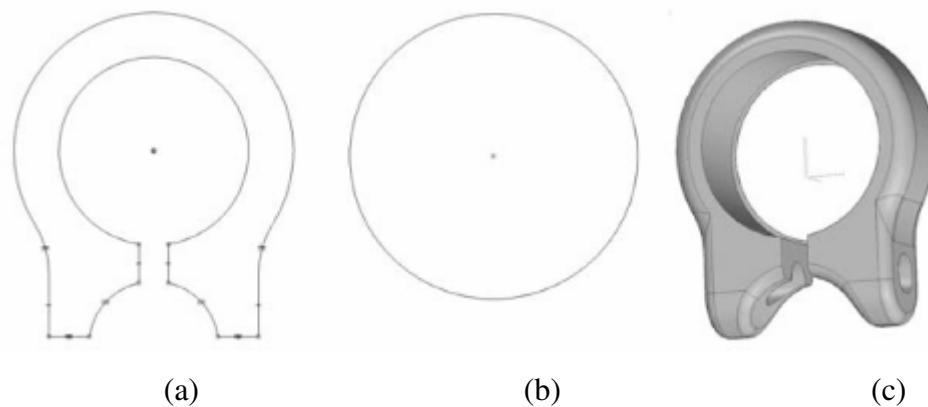


Figura 5 – *Sketches* e sólido com *features*.

2.9.3 Restrições Geométricas

É recomendado por Alves (2002) o uso de restrições geométricas para se evitar que a geometria se altere quando forem feitas modificações dimensionais. Desta forma, restrições como paralelismo, perpendicularidade, igualdade e etc., são geralmente utilizadas antes do dimensionamento do *sketch* visando manter uma estabilidade geométrica. O dimensionamento é também considerado como restrição dimensional.

De acordo com Foggiatto *et al.* (2002), existem duas maneiras de aplicar as restrições geométricas ao sketch: diretamente pelo usuário ou detectadas automaticamente pelo próprio programa (*software*) de modelagem. Como a aplicação manual de todas as restrições pelo usuário pode consumir muito tempo, atualmente a maioria dos *softwares* possuem a opção de perceber a necessidade de uma restrição e aplicá-la automaticamente. Entretanto, pode ocorrer *over-constraint*, que nada mais é do que aplicação de mais restrições do que é realmente necessário, forçando a uma intervenção do usuário para correção de tal não conformidade. Alguns programas possuem uma forma de aumentar ou diminuir a sensibilidade de auto-deteção, porém como esta regulagem é global, pode acabar afetando outras restrições que antes funcionavam satisfatoriamente.

2.9.4 *Features* e o CAE

Anderl e Mendgen (1995) definem que a relações de parentesco entre *features* ocorrem toda vez que uma *feature* é criada utilizando-se elementos tais como arestas, faces, centros, perfis, etc., de uma outra *feature* anteriormente criada como referência. E isto pode ocorrer quando se usam comandos como *use edge*, *include* e etc., que aproveitam a geometria anterior como base para sua construção. Recomenda-se que as referências sejam os planos principais e auxiliares ou a *feature* base. Porém, isto não é sempre possível e, nestes casos, devem-se estabelecer estas relações de forma que, se necessário, seja possível suprimir ou excluir esta *feature*, sem comprometer a integridade do modelo. Em certas *features*, como de arredondamentos e chanfros, não se pode evitar tais relações. Então sugere-se que sejam aplicadas por último no modelo com a finalidade de permitir ou tornar mais simples a supressão ou remoção destas *features*, se preciso, para simulação do comportamento mecânico de uma peça pelo MEF utilizando-se da tecnologia CAE.

Também no dimensionamento dos *sketches*, deve-se evitar a cotagem em relação às geometrias já existentes. Recomenda-se utilizar os planos principais ou a *feature* base para impedir relações de parentesco indesejáveis. Para ajudar, alguns sistemas possuem comandos que possibilitam a seleção de entidades que estão sobrepostas às outras, permitindo a escolha adequada das referências.

3.0 Metodologia

No presente estudo, o comportamento mecânico da estrutura inferior da base guia sujeita ao carregamento externo foi considerado, por se tratar de um elemento estrutural primário de acordo com a norma DNV No. 2.7-3 (*Det Norske Veritas*, 2006). Modelos numéricos não-lineares foram desenvolvidos para analisar o estado de tensões da estrutura durante o carregamento. Uma análise paramétrica considerando uma carga vertical e outra horizontal foi conduzida utilizando o teste de convergência para o refinamento da malha.

Toda análise foi realizada em programas já consagrados na indústria. Tanto na modelagem de cada componente da base guia quanto na montagem do modelo final da estrutura foi utilizado o *software* Autodesk Inventor®. Este modelo foi, então, introduzido e processado pelo método dos elementos finitos no *software* ANSYS®.

3.1 Geometria do modelo

Conforme definido anteriormente, a DNV No. 2.7-3 (*Det Norske Veritas*, 2006) estabelece que apenas a estrutura primária deve ser incluída na análise estrutural de um equipamento. Portanto, foi gerado o modelo em 3D da estrutura inferior da base guia submarina, ou seja, sem os postes de guia e o sistema de travamento central que trava a base ao sistema de cabeça de poço. O equipamento completo da base guia pode ser observado na figura 3, apresentada no Capítulo 2.

O modelo foi baseado no desenho de detalhamento em duas dimensões (2D) da estrutura inferior da base guia permanente, produzido no *software* Autodesk AutoCad® Mechanical 2009 conforme ilustrado no ANEXO A – Detalhamento da estrutura inferior. Pode-se perceber também no ANEXO A – Detalhamento da estrutura inferior, que as principais dimensões, como a distância entre postes, e a configuração geral da estrutura estão em acordo com a especificação da norma API 17D (*American Petroleum Institute*, 1992).

A partir das dimensões destes desenhos de detalhamento foi gerado o modelo da estrutura em três dimensões (3D) utilizando-se o *software* Autodesk Inventor® Professional 2010. Os componentes da estrutura foram modelados separadamente e em seguida unidos como se pode observar na figura 6. Foram representados apenas os itens de importância estrutural ao equipamento. Ou seja, painéis laterais, olhais de içamento e anodos para proteção catódica não foram representados com o intuito de produzir um modelo mais enxuto que facilitasse o processamento pelo Método dos Elementos Finitos (MEF), porém, sem comprometer a confiabilidade dos resultados, visto que tais itens não conferem resistência à estrutura.

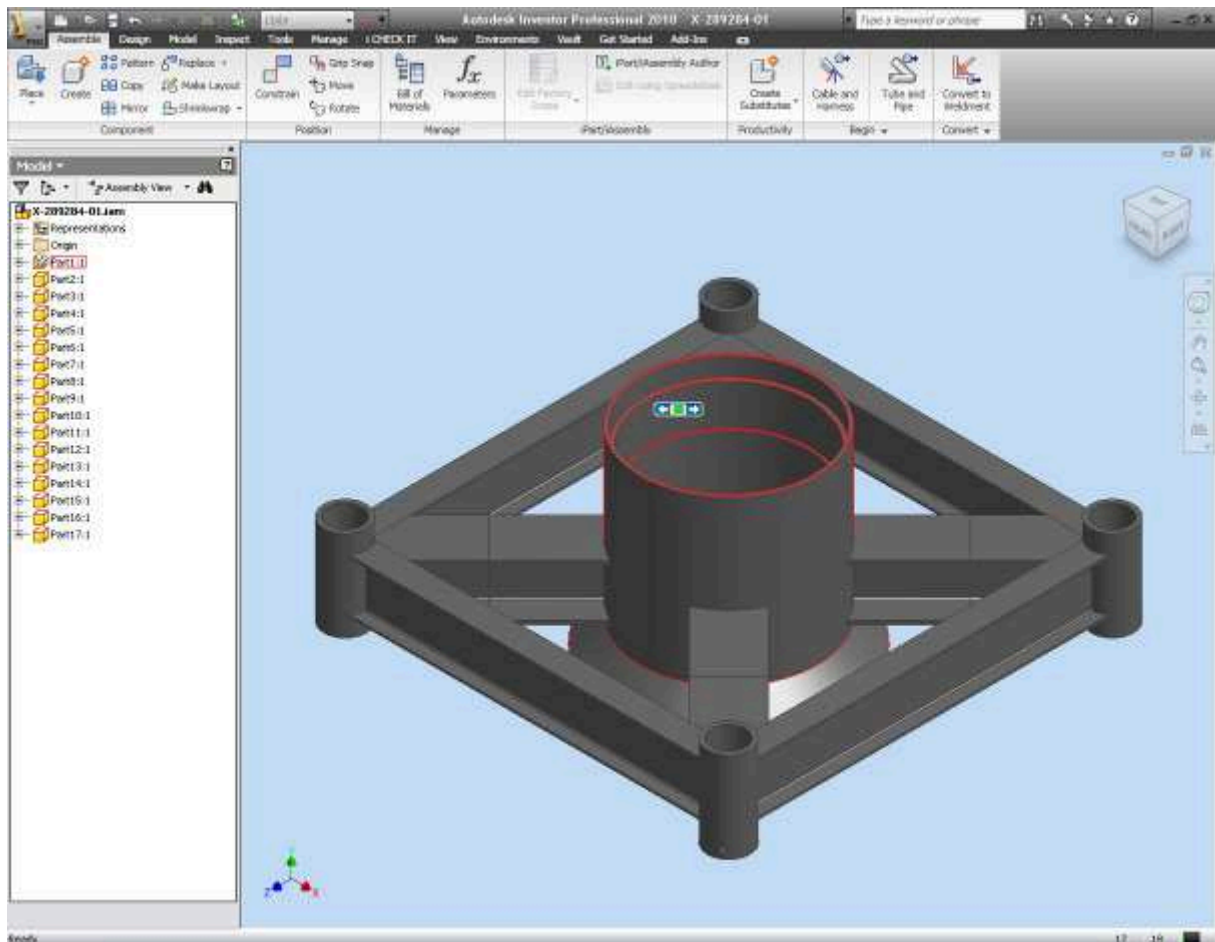


Figura 6 – Modelo da estrutura inferior.

3.2 Modelo de Elementos Finitos (EF)

O modelo matemático utilizado na análise pelo método dos elementos finitos foi gerado no *software* ANSYS® *Workbench* 11.0 que permite importar modelos criados em programas de modelagem desde que estes possuam interface com o ANSYS®, e o Inventor® tem esta funcionalidade. O primeiro passo para a criação do modelo de EF foi importar a estrutura em 3D para o ANSYS® e, para isso, teve-se que salvar o modelo com a extensão “.sat” pelo Inventor®. A figura 7 mostra o arquivo “.sat” já importado para o ambiente do ANSYS®.

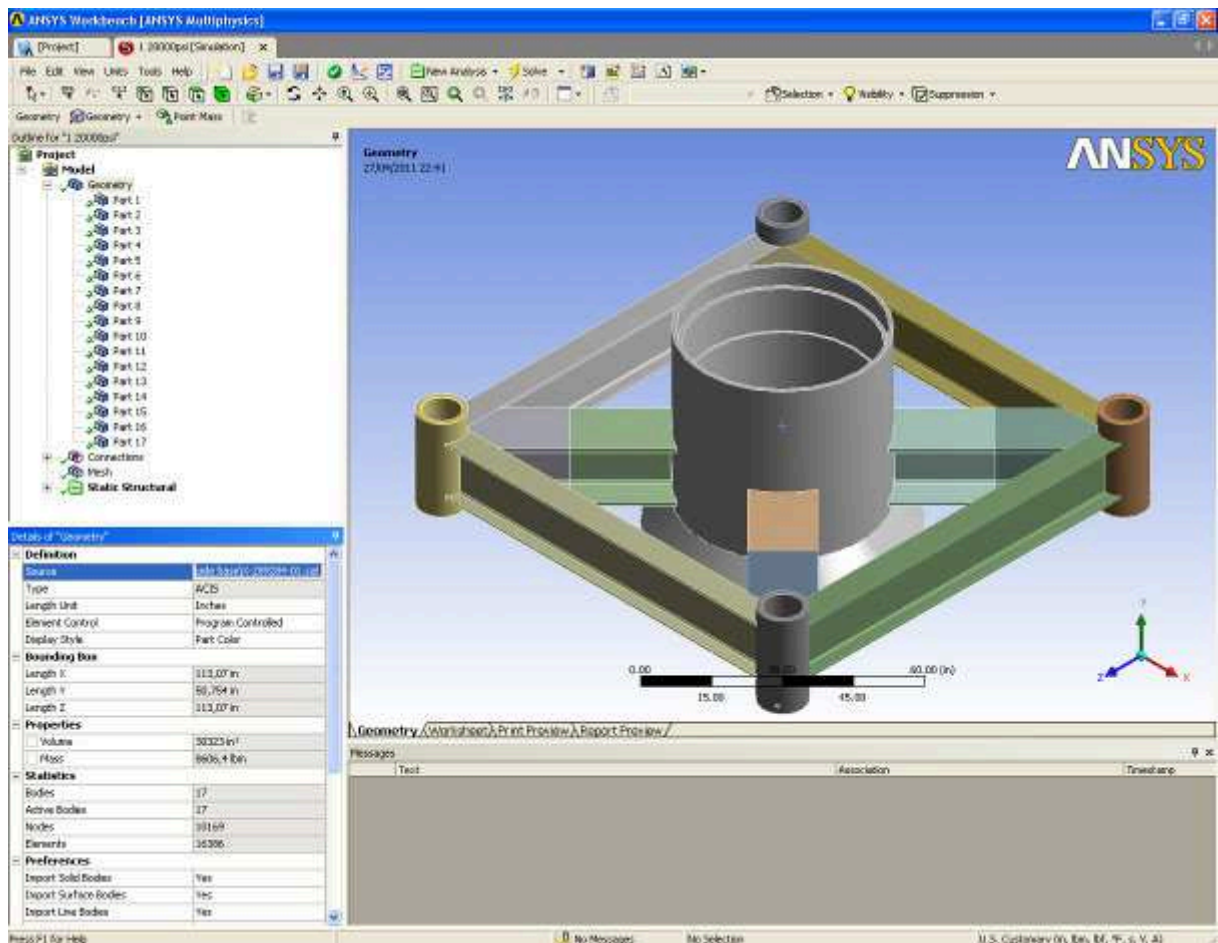


Figura 7 – Modelo importado para o ANSYS.

3.2.1 Conexões

Uma vez que se tem o modelo da estrutura inferior da base guia dentro do ambiente de simulação do ANSYS® é preciso definir os tipos de conexões entre os sub-componentes do conjunto. Grande parte dos contatos entre estes itens são automaticamente identificados e definidos pelo programa, entretanto foram conferidas todas as conexões do modelo com o intuito de assegurar que o modelo representasse as condições reais.

A estrutura da base guia é um conjunto soldado onde as especificações de desenho, em acordo com a DNV No. 2.7-3 (*Det Norske Veritas*, 2006), exigem que todas as soldas entre os componentes sejam feitas com penetração total. Levou-se isto em consideração e foram definidos todos os contatos como *bonded*, que pode ser visto na figura 8. Este tipo de contato não permite deslizamento ou separação entre as faces e vértices dos corpos, portanto, pode-se dizer que os corpos estarão “colados”. Segundo o manual do ANSYS® (2007), se o modelo matemático determina o contato *bonded*, então qualquer separação ou penetração será ignorada.

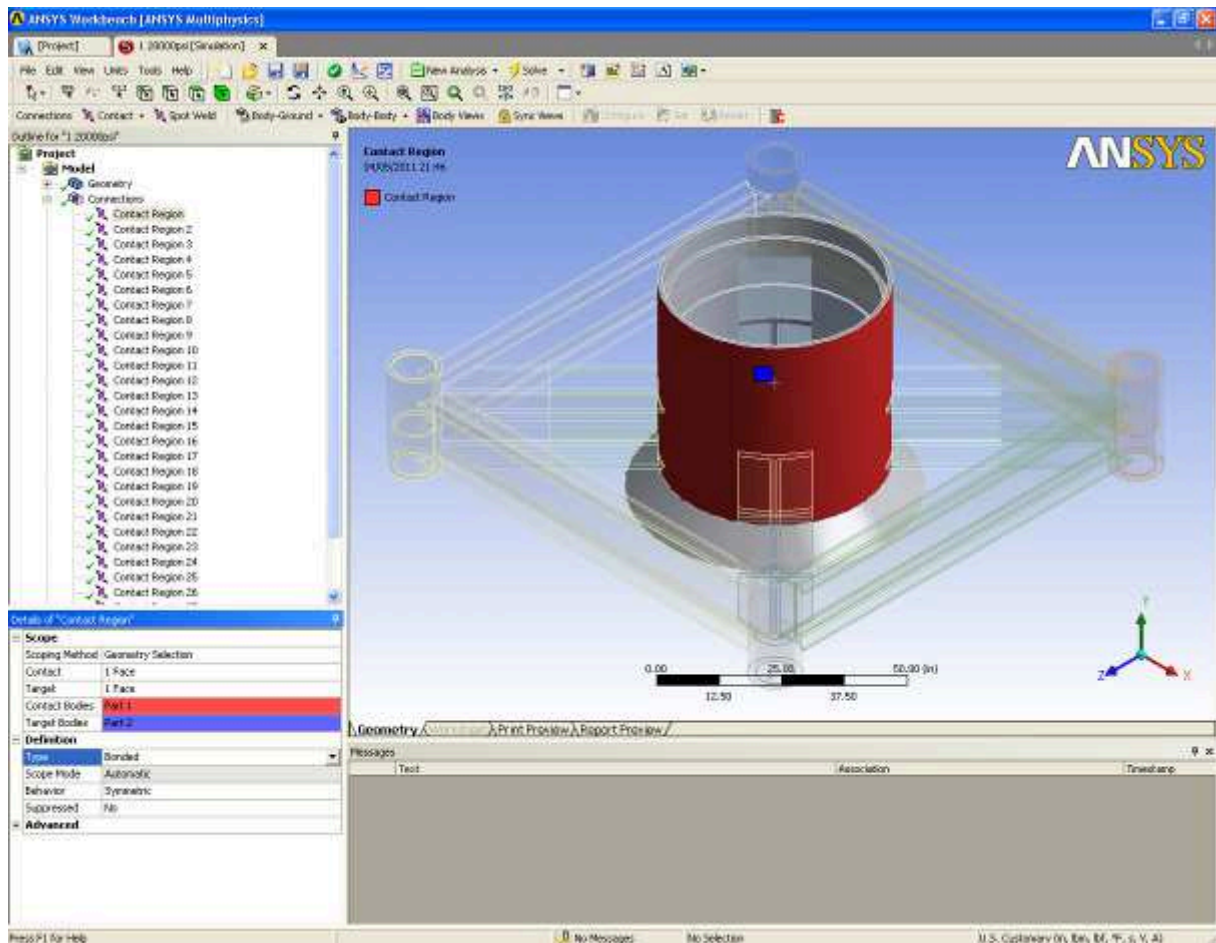


Figura 8 – Definição dos contatos.

Apesar de especificados os cordões de solda nos desenhos apresentados no ANEXO A – Detalhamento da estrutura inferior, estes não foram representados, pois aumentariam o tempo de modelagem e processamento do modelo de EF. Além do que, foram experimentadas dificuldades para se representar os filetes de solda na interface das vigas diagonais e o calandrado central, devido à complexidade de se gerar um filete concordante entre a viga e a chapa.

3.2.2 Material

O material especificado para a fabricação da base guia é um aço estrutural amplamente utilizado pelas indústrias na Europa e que atende a norma BS EN 10025 (*British Standard*, 2003). Este aço pode ser fornecido nas mais diversas formas, inclusive chapas, placas e tubos para aplicações submarinas ou estruturais, ainda segundo esta norma. O material possui as seguintes propriedades mecânicas que podem ser observadas na tabela 1.

Tabela 1 – Propriedades mecânicas do material.

Propriedade	Valor
Módulo de Young	29.008.000 psi
Coefficiente de Poisson	0,3
Densidade	0,28383 lb/in ³
Tensão de Escoamento	50.000 psi
Tensão de Ruptura	60.000 psi
Módulo Tangencial	1.450.400 psi

O ANSYS® *Workbench* possui um módulo para inserção de dados de material, o *Engineering Data*, que, além de trazer em seu banco de dados as propriedades de diversos materiais, possibilita ao usuário definir propriedades de um determinado material. Além de propriedades básicas, como módulo de elasticidade, coeficiente de Poisson e massa específica, permite, ainda, definir as tensões de escoamento e ruptura do material separadamente para cargas de compressão e tração. Propriedades térmicas e eletromagnéticas também podem ser definidas da mesma maneira se necessário.

Desta forma, os valores expostos na tabela 1 foram inseridos na simulação e, por se tratar de um aço, o endurecimento isotrópico bi-linear do material foi considerado para representar o diagrama de tensão x deformação deste material baseado nos valores de tensão de escoamento e módulo tangencial. A figura 9 mostra as propriedades inseridas no *Engineering Data* e o gráfico de tensão x deformação gerado.

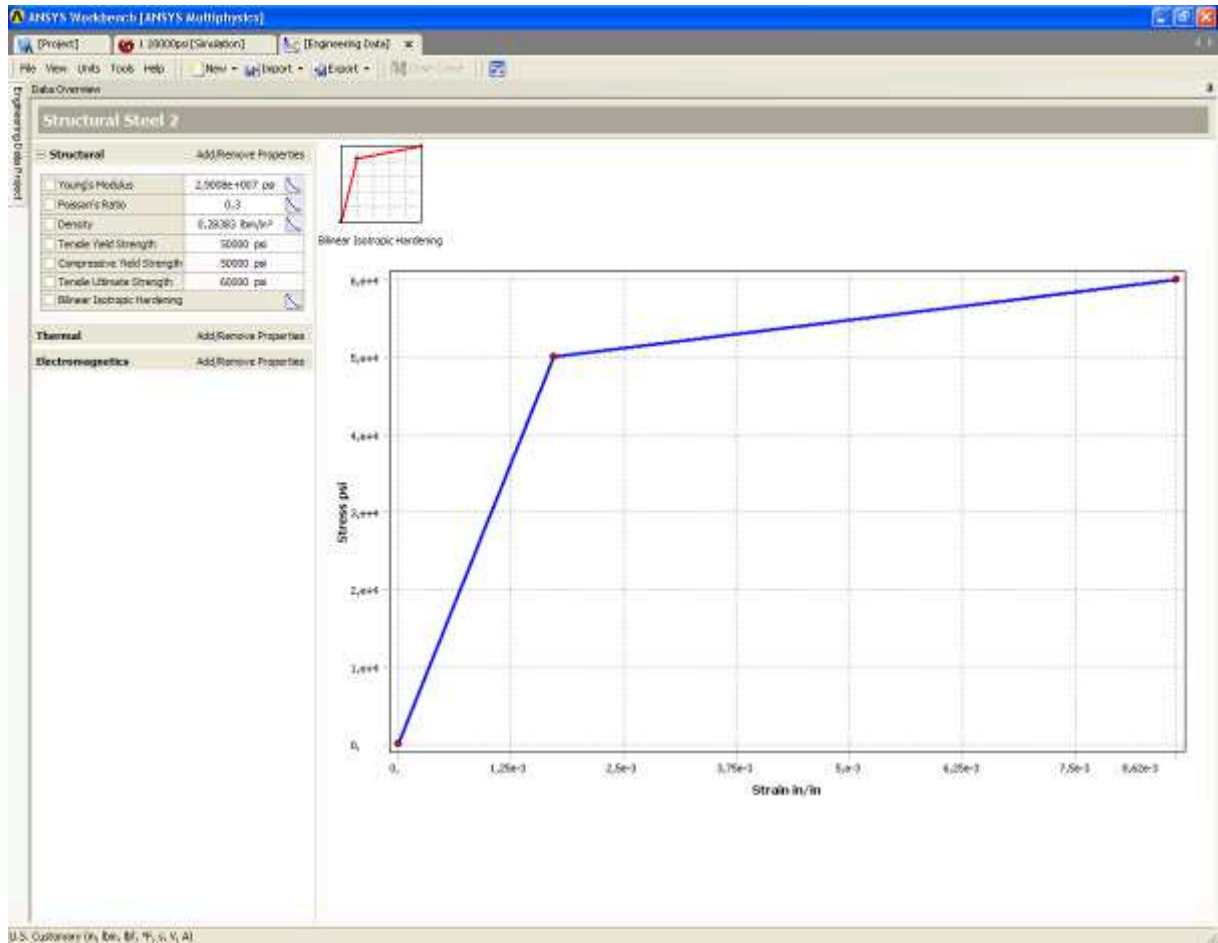


Figura 9 – Propriedades do aço.

3.2.3 Malha

A malha do modelo de elementos finitos foi gerada no módulo *mesh generator*, o qual permite que os elementos sejam escolhidos automaticamente pelo ANSYS® ou que sejam definidos pelo usuário.

Utilizou-se uma malha com preferência física mecânica e método automático (*patch conforming*), em que a forma dos elementos da malha se adapta de maneira a seguir a geometria do corpo. Foram aplicados elementos hexaédricos em todas as vigas onde a geometria permitiu. Como se pode observar na figura 10, as metades mais externas das vigas diagonais, por possuírem recortes complexos na sua interface com os tubos e vigas laterais,

acusaram erro ao se tentar gerar malha hexaédrica. Em todos os demais componentes foram aplicados elementos tetraédricos. Apesar de Filho (2007) apresentar a aplicação de elementos hexaédricos por melhor representarem o comportamento das vigas e os tetraédricos os dos corpos sólidos, estas vigas com elementos tetraédricos não serão as mais solicitadas e, portanto, não comprometerão a qualidade da malha.

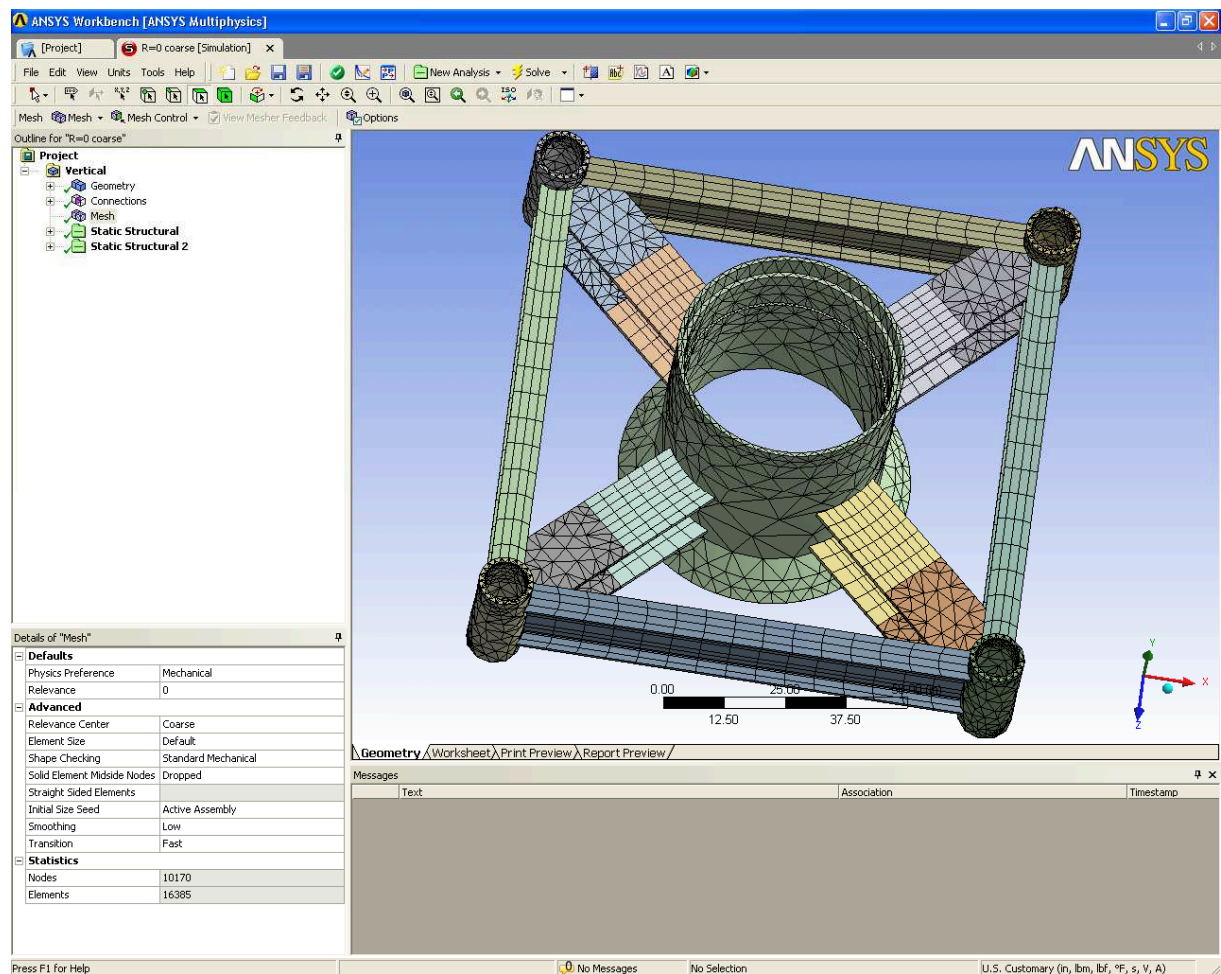


Figura 10 – Malha inicial.

A malha inicial foi gerada com ajuste geral de parâmetro de relevância zero e centro de relevância *coarse*. A malha obtida com estes parâmetros pode ser observada na figura 10, com um total de 10.170 nós e 20.053 elementos, sendo 3.668 elementos de contato e 16.385 elementos sólidos. Estes ajustes geraram uma malha “grosseira”, que foi criada com o intuito de se iniciar as simulações e definir os pontos críticos mais solicitados da estrutura para um posterior refinamento da malha e obtenção de respostas mais acuradas até que se obtivesse uma convergência de resultados.

Foi aplicado, então, o primeiro refinamento com dois tipos de controle de tamanho de elementos. Na viga transversal utilizou-se o comando *body sizing* e os elementos neste corpo foram reduzidos para o tamanho de 2” e no corpo central foi adotado o *face sizing* que também reduziu os elementos desta face para 2”. A figura 11 mostra como ficou a malha após o aumento do número de elementos – 13.188 nós e 23.107 elementos sólidos.

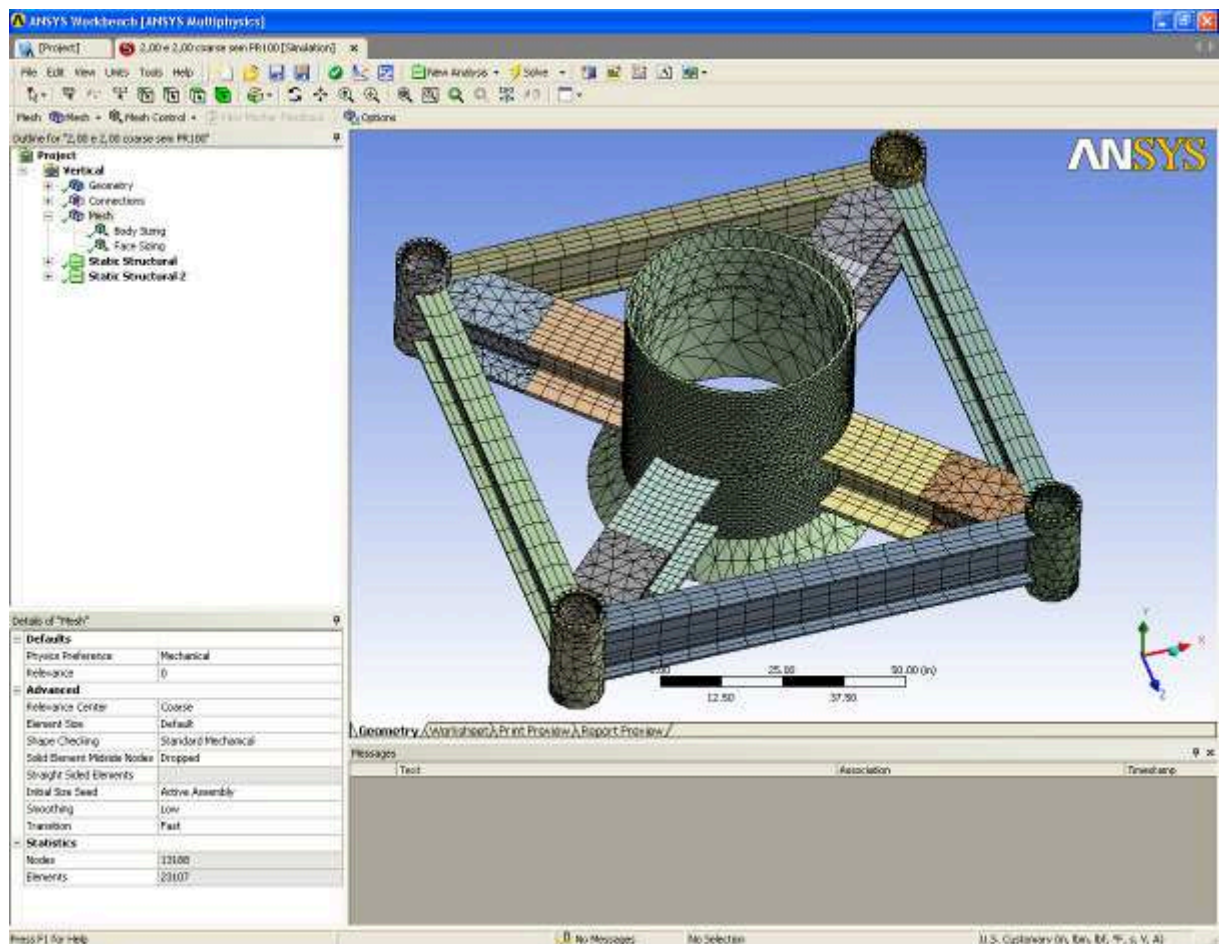


Figura 11 – Primeiro refinamento da malha.

No segundo refinamento, aumentou-se o parâmetro de relevância para 100, que é o máximo valor permitido pelo programa na viga transversal mais solicitada e no corpo cilíndrico central unido a ela. O modelo passou então a ser composto de 14.188 nós e 26.330 elementos sólidos como pode ser percebido na figura 12.

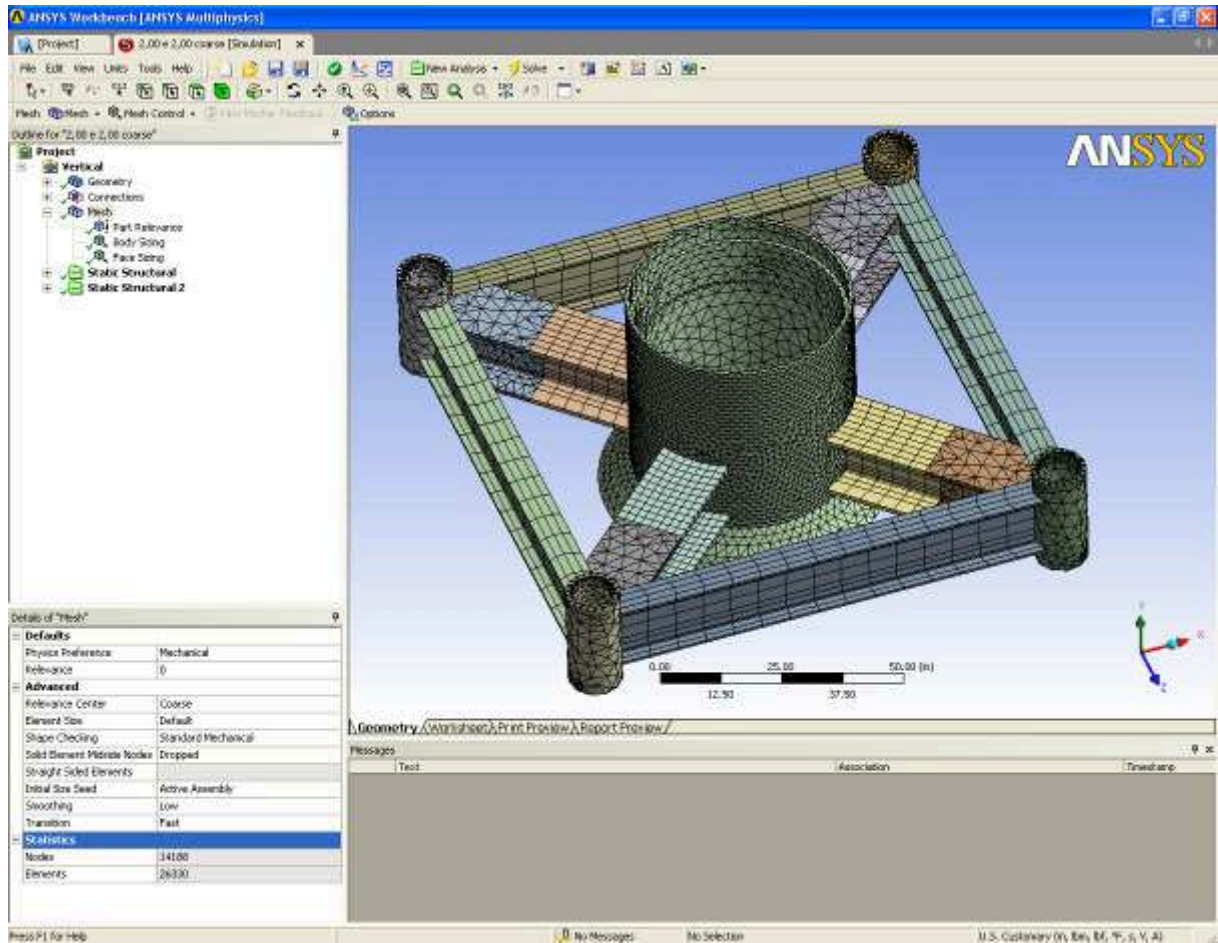


Figura 12 – Segundo refinamento da malha.

Já no terceiro refinamento, ajustou-se o centro de relevância geral da malha de *coarse* para *fine* e obteve-se um novo modelo com 25.111 nós e 38.421 elementos sólidos que pode ser observado na figura 13.

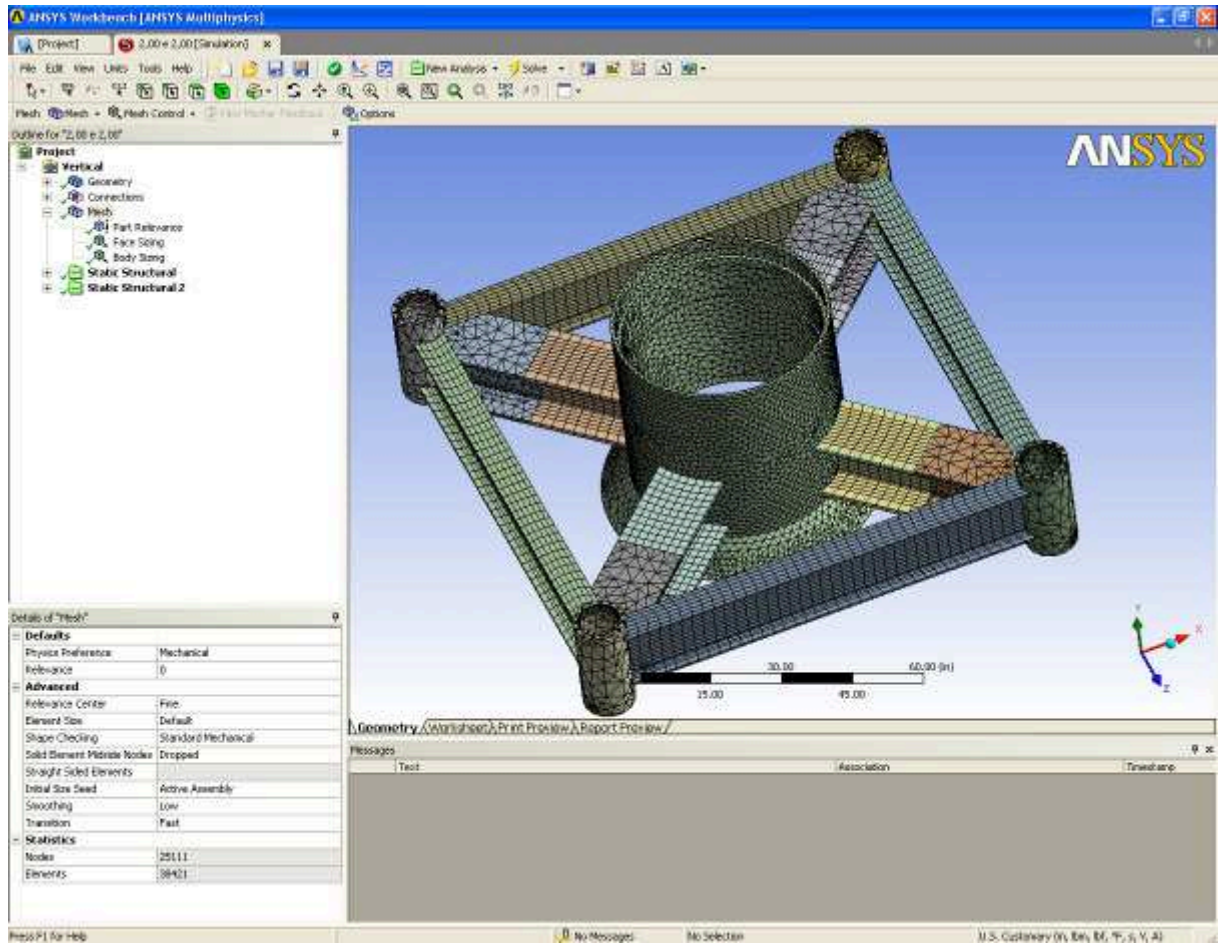


Figura 13 – Terceiro refinamento da malha.

No quarto e último refinamento foram modificados os parâmetros descritos no primeiro refinamento, porém com a redução do tamanho dos elementos de 2" para 1,5". A figura 14 mostra como ficou a malha após o aumento do número de elementos – 27.809 nós e 44.480 elementos sólidos.

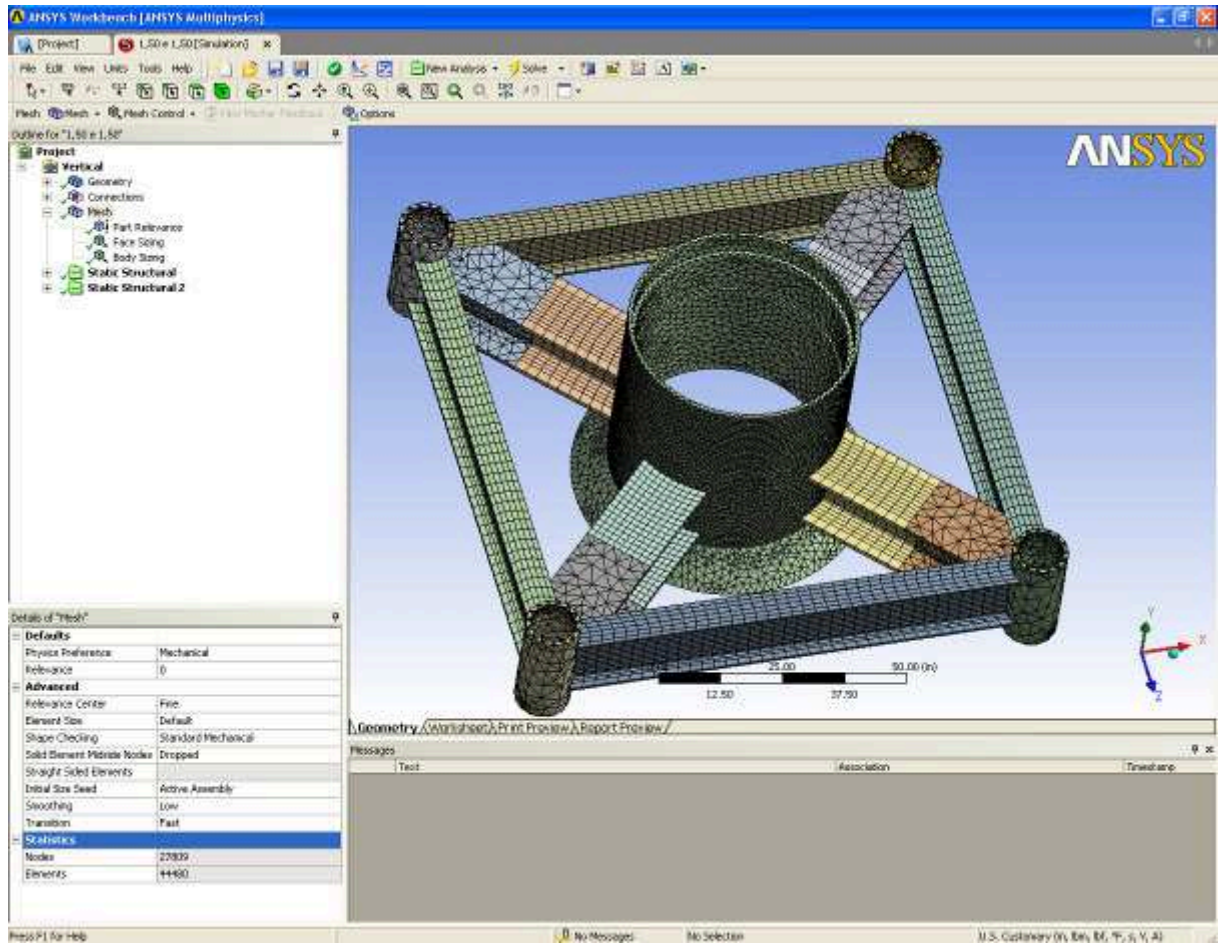


Figura 14 – Quarto refinamento da malha.

3.2.4 Cargas e condições de contorno

O tipo de análise adotado para a simulação no ANSYS® foi a estrutural estática na qual se definiu a fixação da estrutura no diâmetro interno do corpo central, pois nesta região é montado o sistema de travamento que fixa firmemente a base guia ao alojamento da cabeça de poço. A fixação adotada foi do tipo *fixed support* mostrada na figura 15 como ponto “A”, que garante a condição de engastamento, ou seja, sem nenhum grau de liberdade. Tal condição é satisfatória, pois o objetivo da análise é verificar a resistência da estrutura e não do sistema de travamento.

O modelo de elementos finitos foi submetido a dois tipos de carregamentos, aplicados diretamente na quina da estrutura e que podem ser observado nas figuras 15 e 16. A força vertical foi aplicada sobre a área onde o poste de guia, uma vez assentado, mantém contato com a estrutura e onde realmente a carga atuaria durante a operação da base guia submarina. Estas forças são de magnitude igual a 75.000 lbf na direção vertical e 100.000 lbf na horizontal e foram aplicadas separadamente, em uma só etapa. Os valores destas cargas foram obtidos com base em dados de campo e fornecidos pelo cliente.

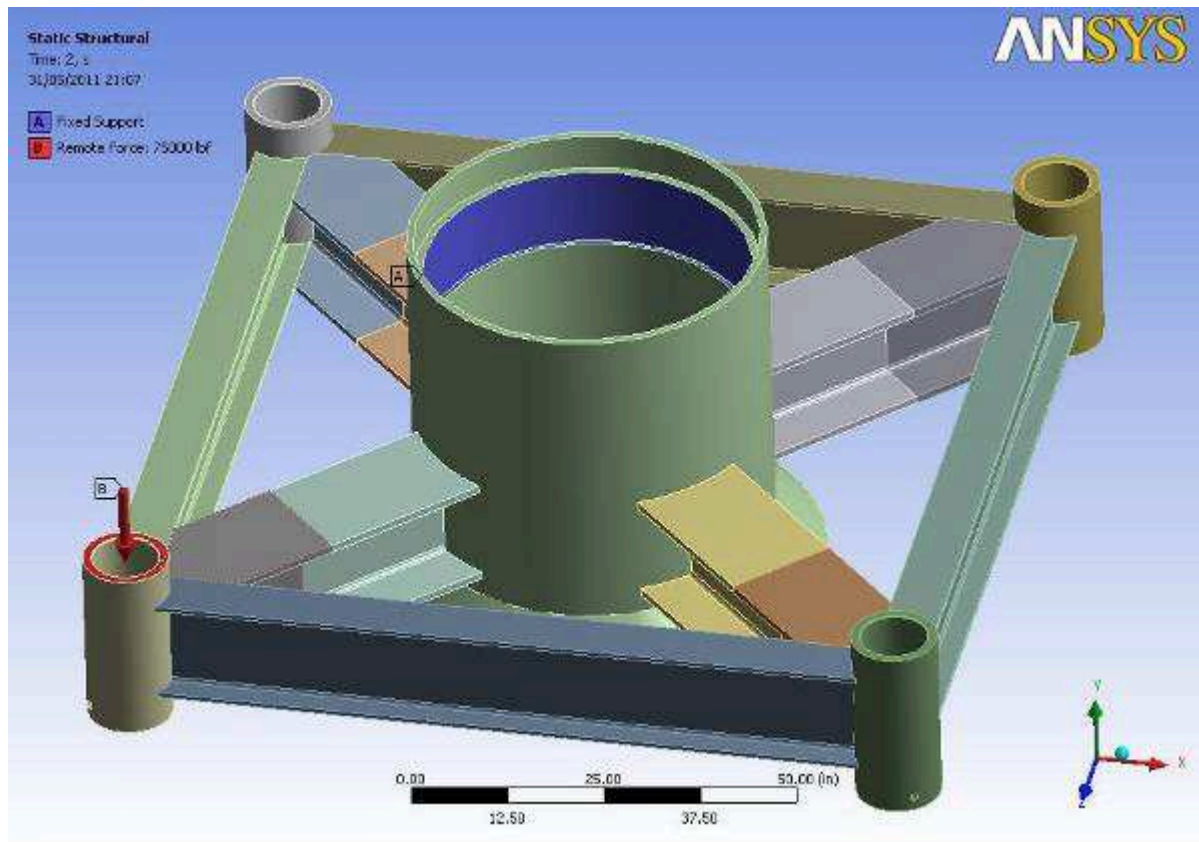


Figura 15 – Fixação e carga vertical.

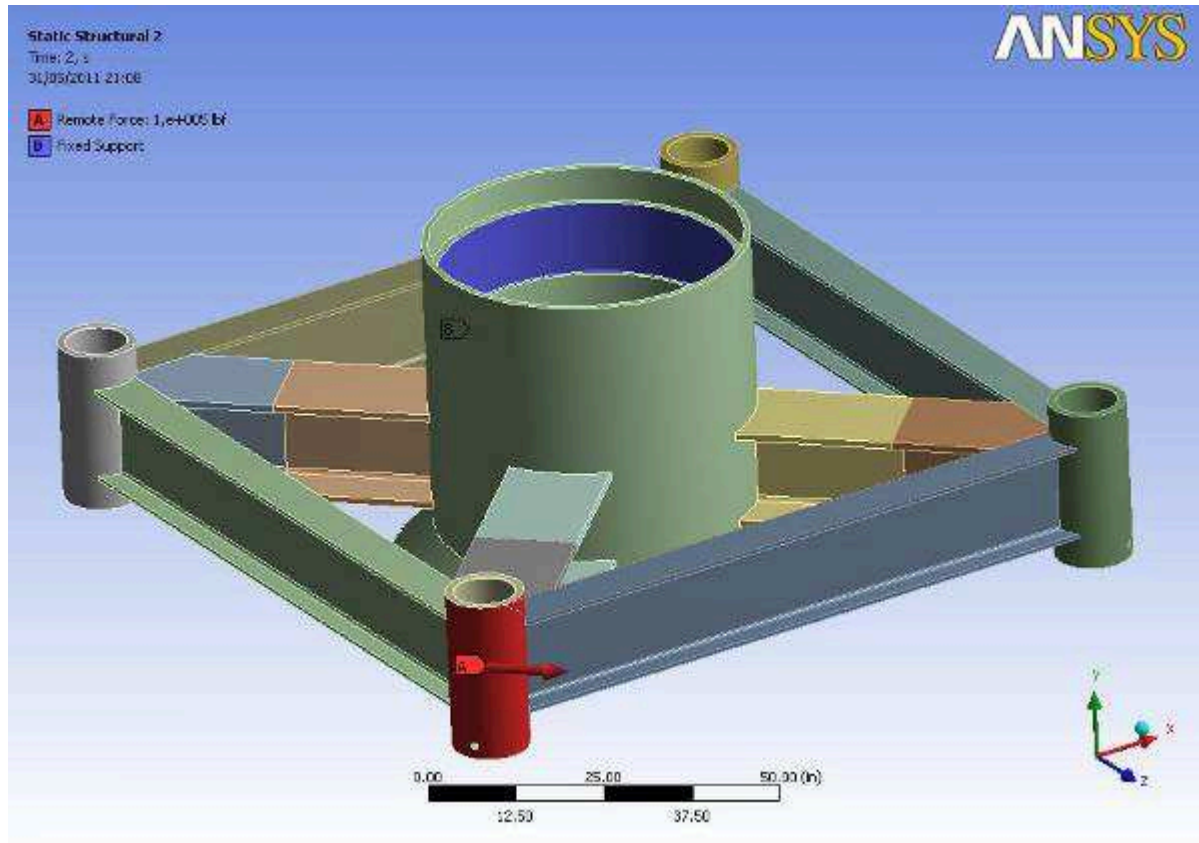


Figura 16 – Fixação e carga horizontal.

3.2.5 Solução

De acordo com o que foi descrito no transcórre deste capítulo, modelos numéricos não-lineares foram desenvolvidos para se analisar o estado de tensões da estrutura durante os carregamentos. Uma análise paramétrica considerando uma carga vertical e outra horizontal foi conduzida, utilizando o teste de convergência para o refinamento da malha.

Foram definidos como respostas para solução do modelo de elementos finitos a obtenção dos valores de tensão equivalente de von-Mises e deslocamento, a serem apresentados no capítulo 4, a seguir. Estes valores foram obtidos após o processamento do modelo pelo programa, o que demandou tempo e disponibilidade exclusiva do computador durante as simulações.

A simulação do primeiro modelo demorou em torno de três minutos para ser concluída. Já no último modelo, o tempo de processamento durou aproximadamente vinte minutos.

O computador utilizado para processar os modelos de elementos finitos possui a seguinte configuração:

- ✓ Processador AMD Athlon(tm) 64 3200+ de 2,00 GHz;
- ✓ Memória RAM de 1,0 GB;
- ✓ Placa de vídeo NVIDIA GeForce 6200 TurboCache(TM) de 512 MB.

4.0 Resultados

Neste capítulo são apresentados os resultados da análise pelo Método dos Elementos Finitos (MEF) da estrutura inferior da base guia submarina, que foi submetida aos carregamentos vertical e horizontal segundo as condições de contorno descritas no capítulo 3, item 3.2.4. Como resultados desta análise, foram coletados os valores máximos de tensão equivalente de von-Mises e do deslocamento para cada modelo de Elementos Finitos (EF), cujas as malhas foram descritas previamente no item 3.2.3.

Os modelos foram processados no ambiente *Simulation* do ANSYS® *Workbench*, onde se realizou análises do tipo estrutural estática. Conforme foram sendo obtidos os resultados de tensão equivalente máxima de von-Mises e da localização desta concentração de tensões, os modelos de EF foram sendo criados. Tais modelos possuíam malhas de qualidade superior e com refinamentos, ou seja, maior quantidade de elementos nos pontos críticos.

Este processo foi repetido até que a convergência dos resultados fosse alcançada tanto para as tensões quanto para os deslocamentos. Também foram calculadas a tensão admissível de von-Mises e a deflexão admissível pelos métodos descritos na DNV No. 2.7-3 (*Det Norske Veritas*, 2006) e mostrados no capítulo 2 (item 2.6.2) para uma posterior comparação com os resultados coletados e averiguação da conformidade do projeto estrutura.

Por fim, novas análises foram feitas tendo-se como base o último modelo. As cargas vertical e horizontal foram aumentadas até que os valores máximos de tensão equivalente de von-Mises e deslocamento ficassem o mais próximos possíveis dos seus respectivos valores admissíveis, determinando, assim, o máximo carregamento ao qual a estrutura inferior da base guia é capaz de suportar.

4.1 Solução dos modelos de EF

O primeiro modelo de elementos finitos, com malha de 10.170 nós e 16.385 elementos, foi solucionado e os resultados de tensão e deslocamento obtidos podem ser observados nas figuras 17 e 18. Também se pode observar que os elementos da viga

transversal, onde ocorreu a máxima tensão de von-Mises, eram desiguais e o tamanho deles foi medido por meio da aproximação (*zoom*) do modelo para perto da escala horizontal mostrada no rodapé das figuras 17 e 18, com isso percebeu-se que os elementos tinham aproximadamente 4” de largura por 2” de comprimento. Apesar da malha ser “grosseira”, a intenção desta primeira simulação era apenas perceber quais pontos da estrutura seriam mais solicitados, e também, por este mesmo motivo, simulou-se apenas com a carga vertical.

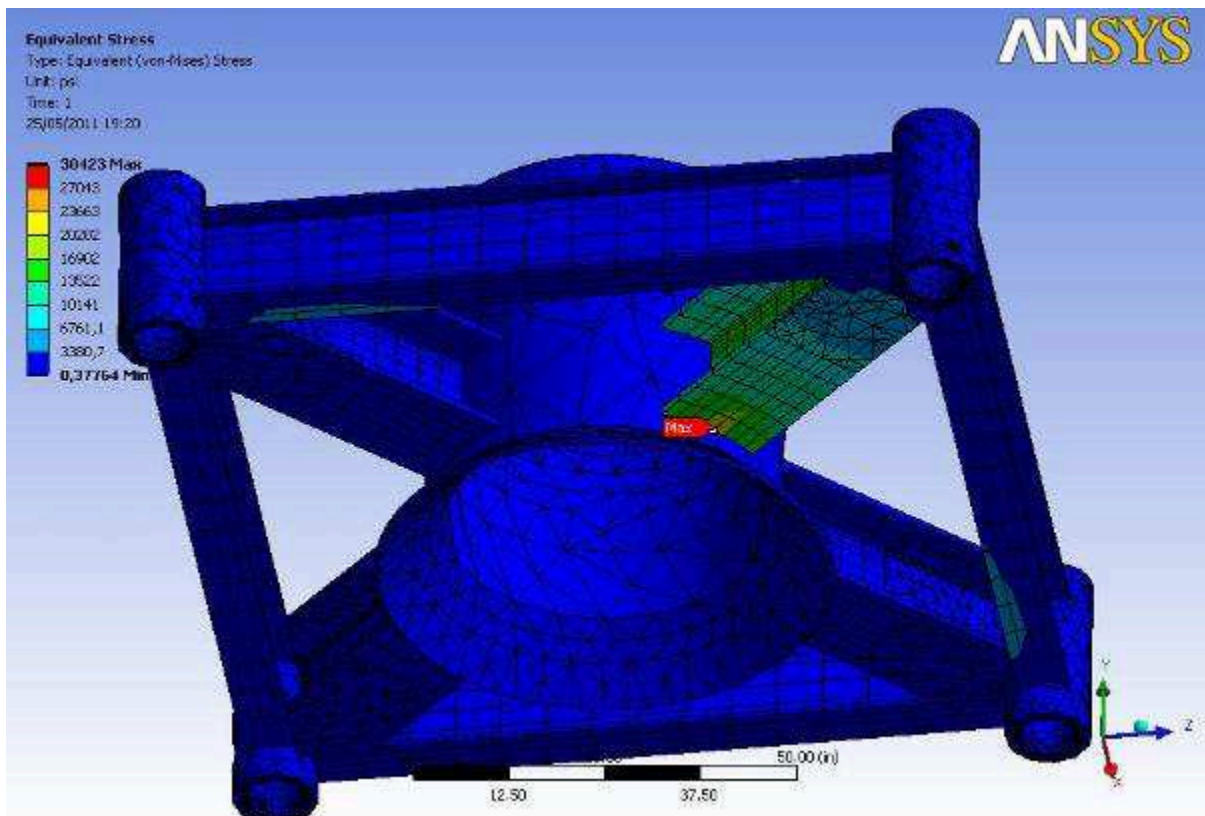


Figura 17 – Tensão de von-Mises pela carga vertical no primeiro modelo.

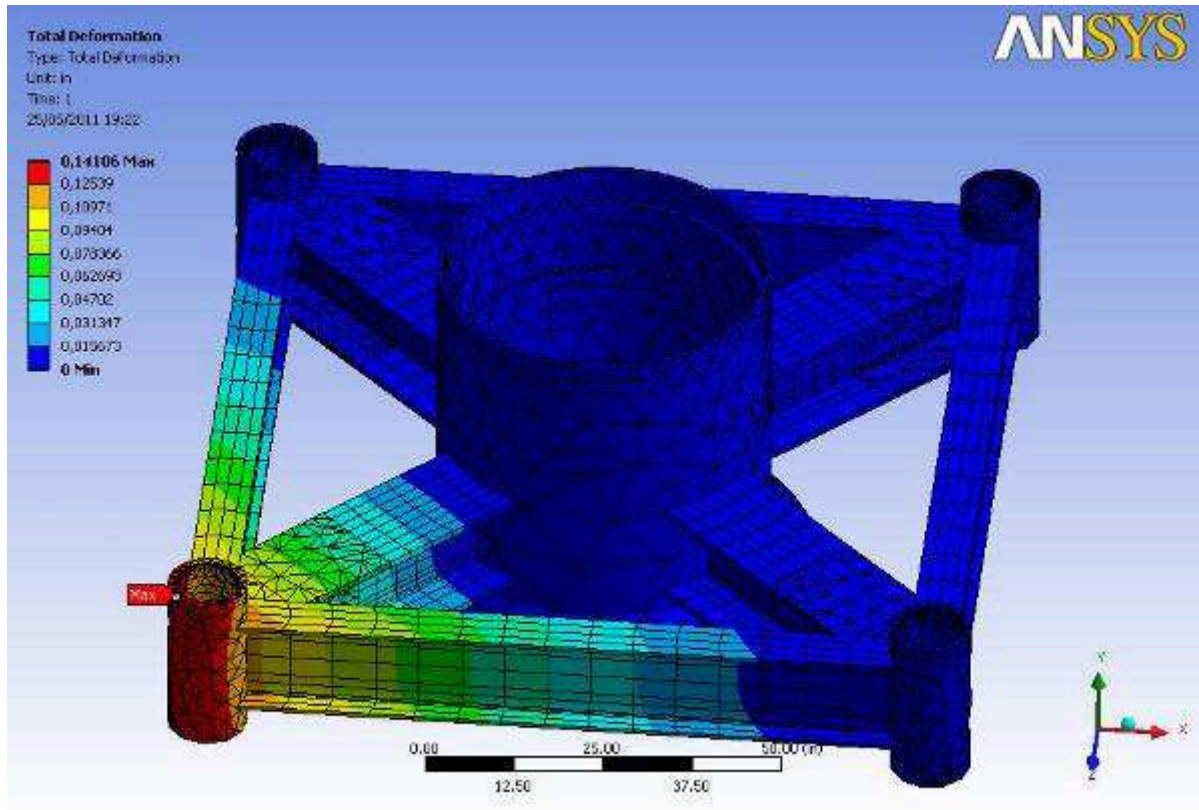


Figura 18 – Deslocamento pela carga vertical no primeiro modelo.

Tomando-se como base a distribuição das tensões ocorridas durante a primeira simulação, um segundo modelo de EF foi criado com refinamento das malhas da viga transversal e do corpo central. Os elementos passaram, então, a ter dimensões de 2" de largura por 2" comprimento e esta regularidade, assim como os resultados obtidos com o segundo modelo, podem ser vistos nas figuras 19, 20, 21 e 22 a seguir.

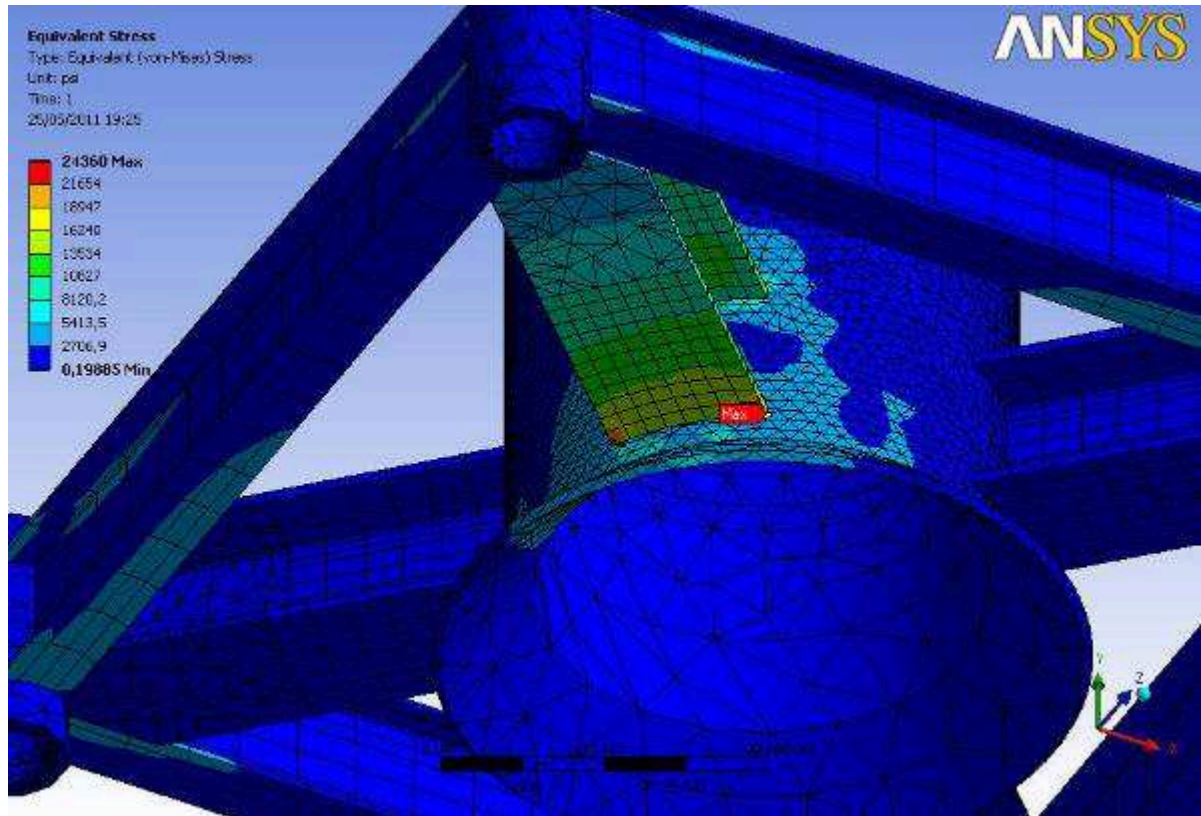


Figura 19 – Tensão de von-Mises pela carga vertical no segundo modelo.

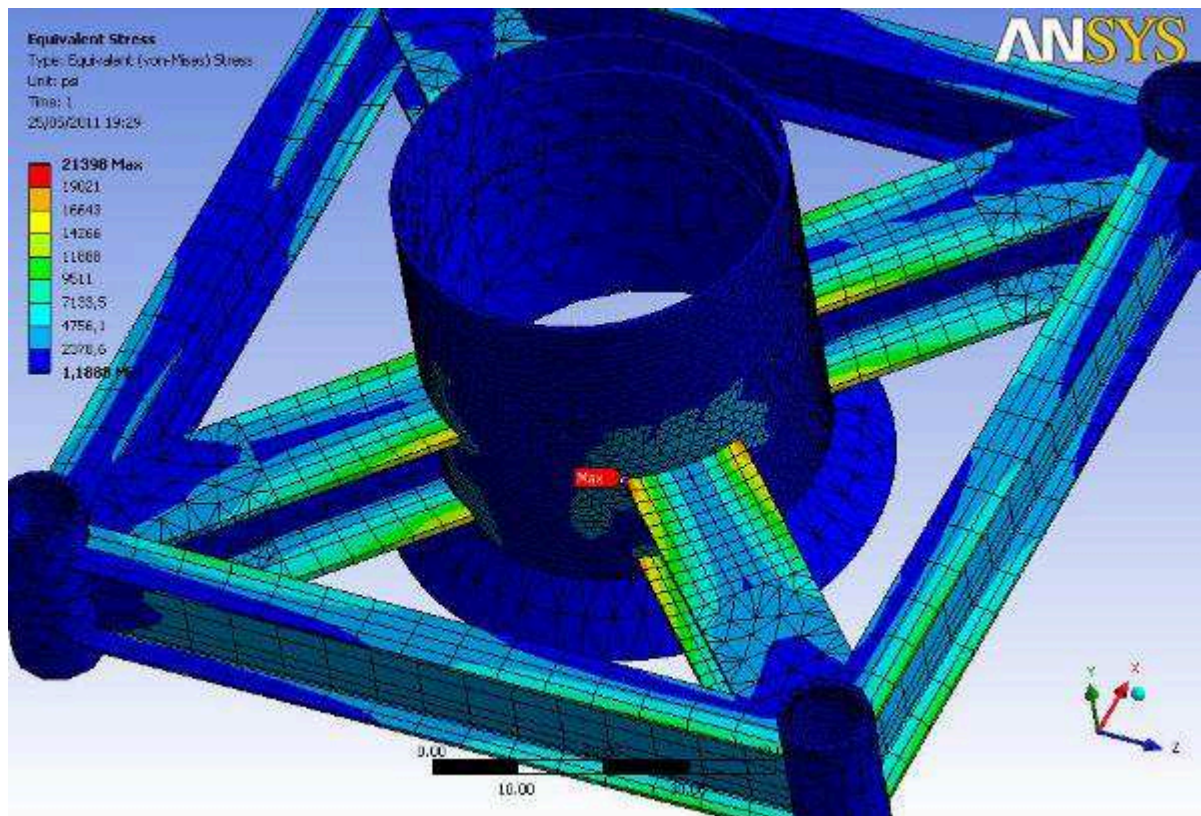


Figura 20 – Tensão de von-Mises pela carga horizontal no segundo modelo.

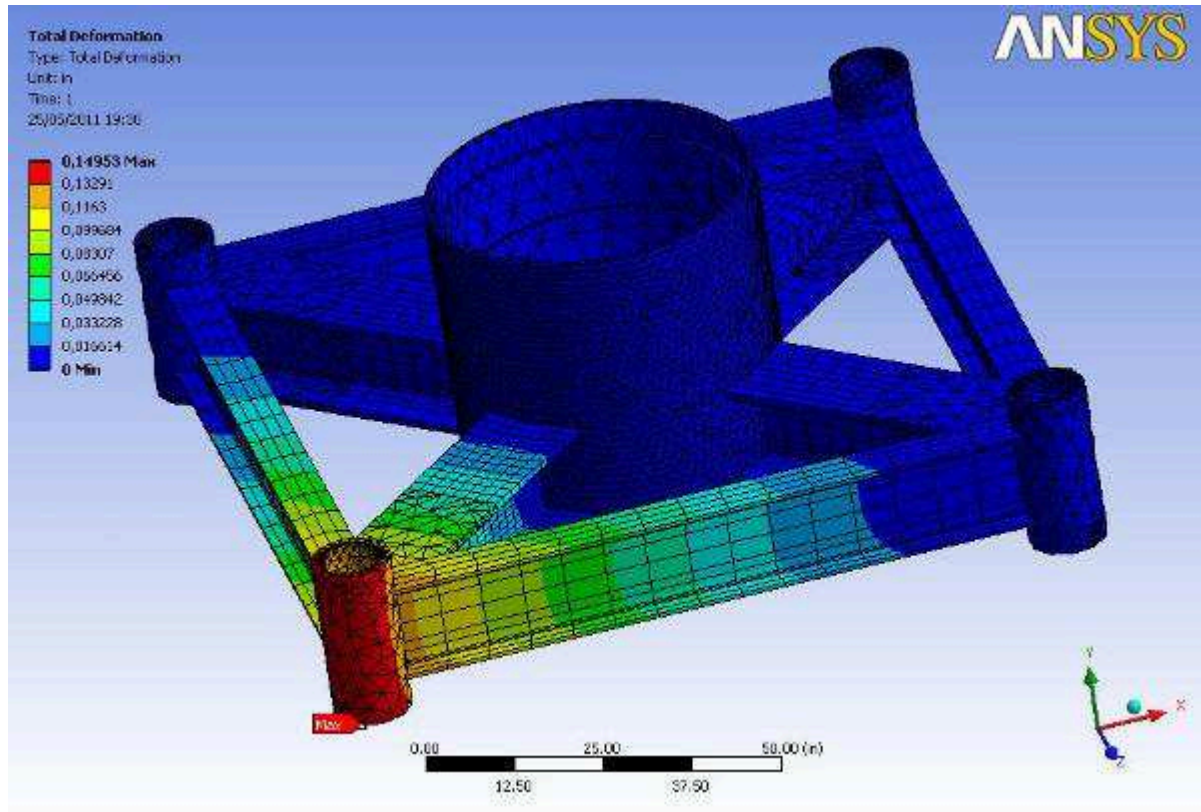


Figura 21 – Deslocamento pela carga vertical no segundo modelo.

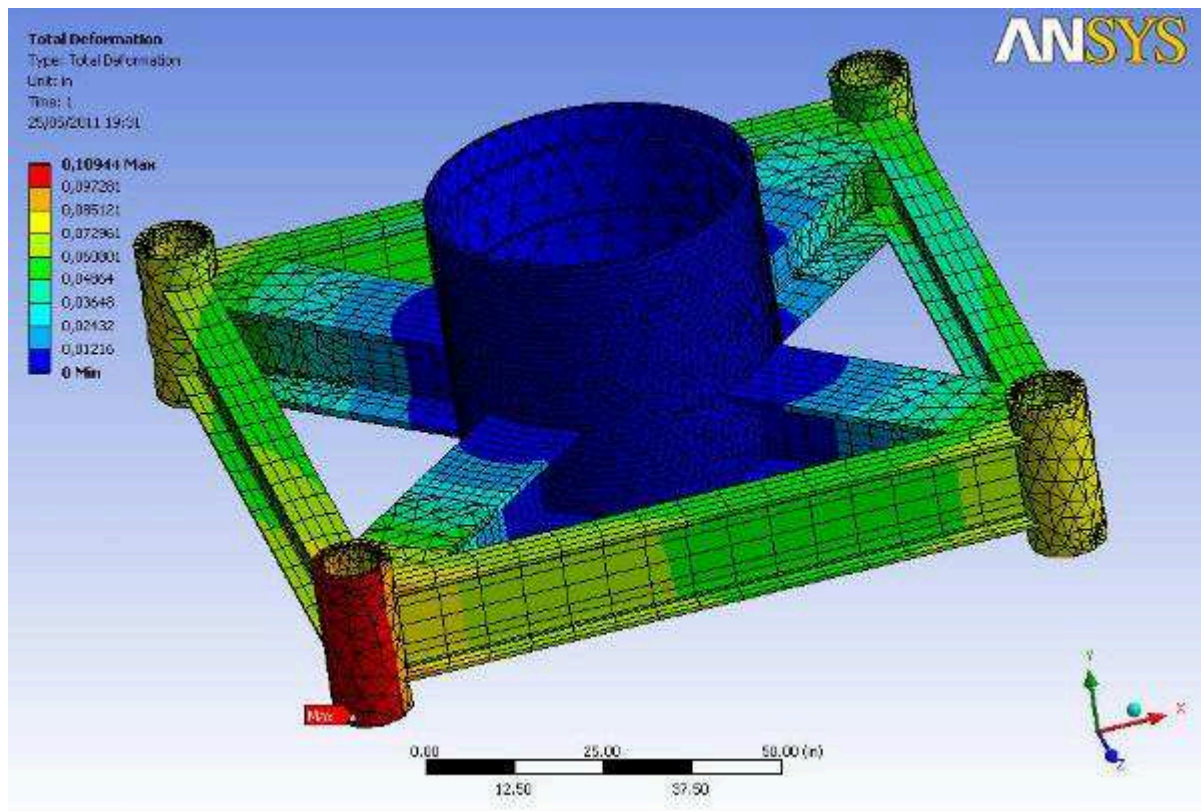


Figura 22 – Deslocamento pela carga horizontal no segundo modelo.

Notou-se que a máxima tensão de von-Mises devido à carga vertical obtida no primeiro modelo divergiu muito da obtida no segundo modelo, entretanto sua localização se manteve relativamente estável. Estes fatores motivaram a criação de um terceiro modelo com uma malha mais refinada nos mesmos pontos de interesse anteriores. Desta vez foi modificado o parâmetro de relevância das malhas da viga e do corpo para 100, e o novo modelo passou a ter 14.188 nós e 23.330 elementos. Os resultados são mostrados nas figuras 23, 24, 25 e 26.

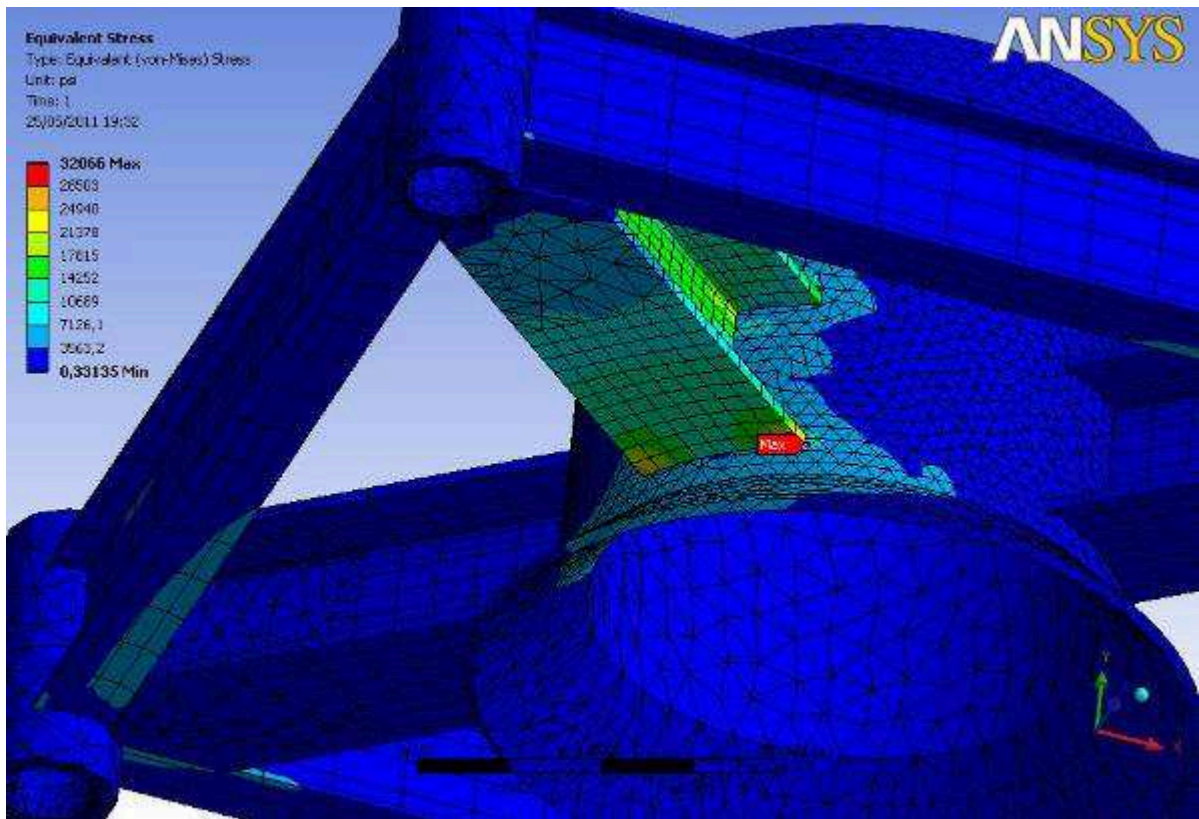


Figura 23 – Tensão de von-Mises pela carga vertical no terceiro modelo.

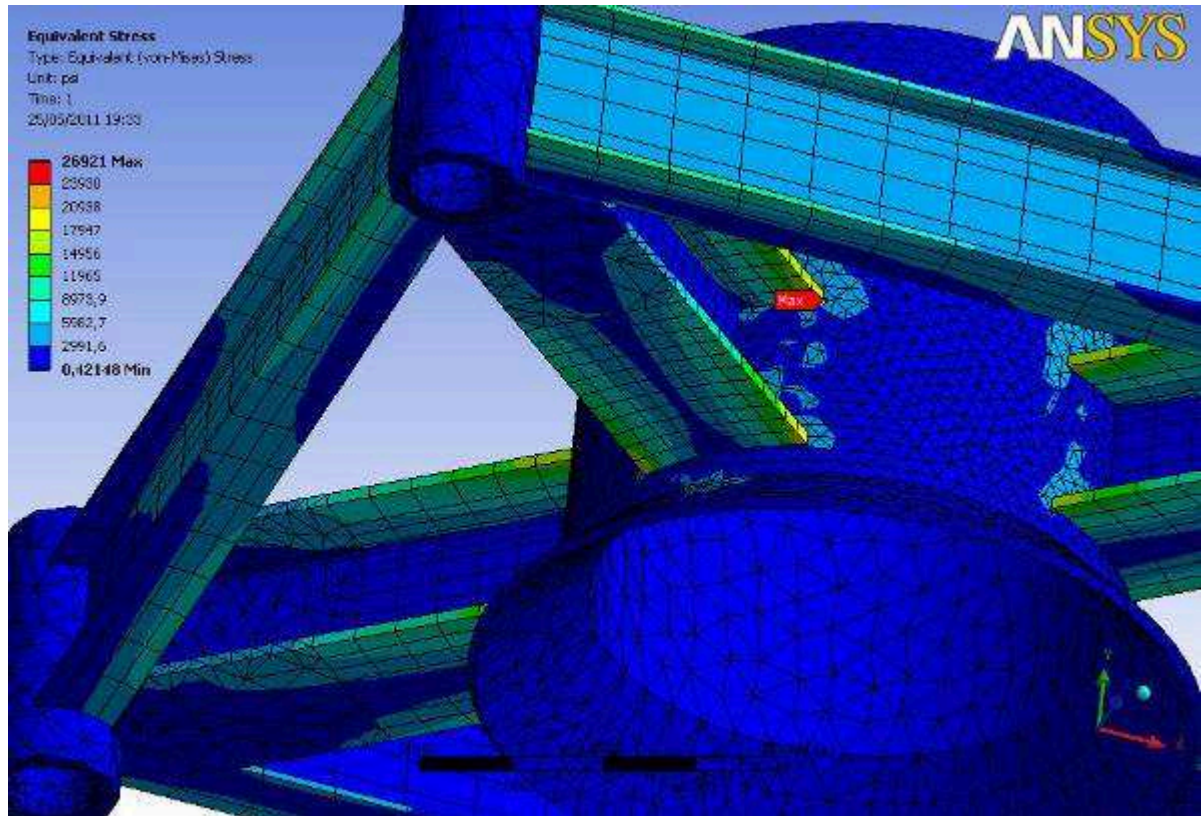


Figura 24 – Tensão de von-Mises pela carga horizontal no terceiro modelo.

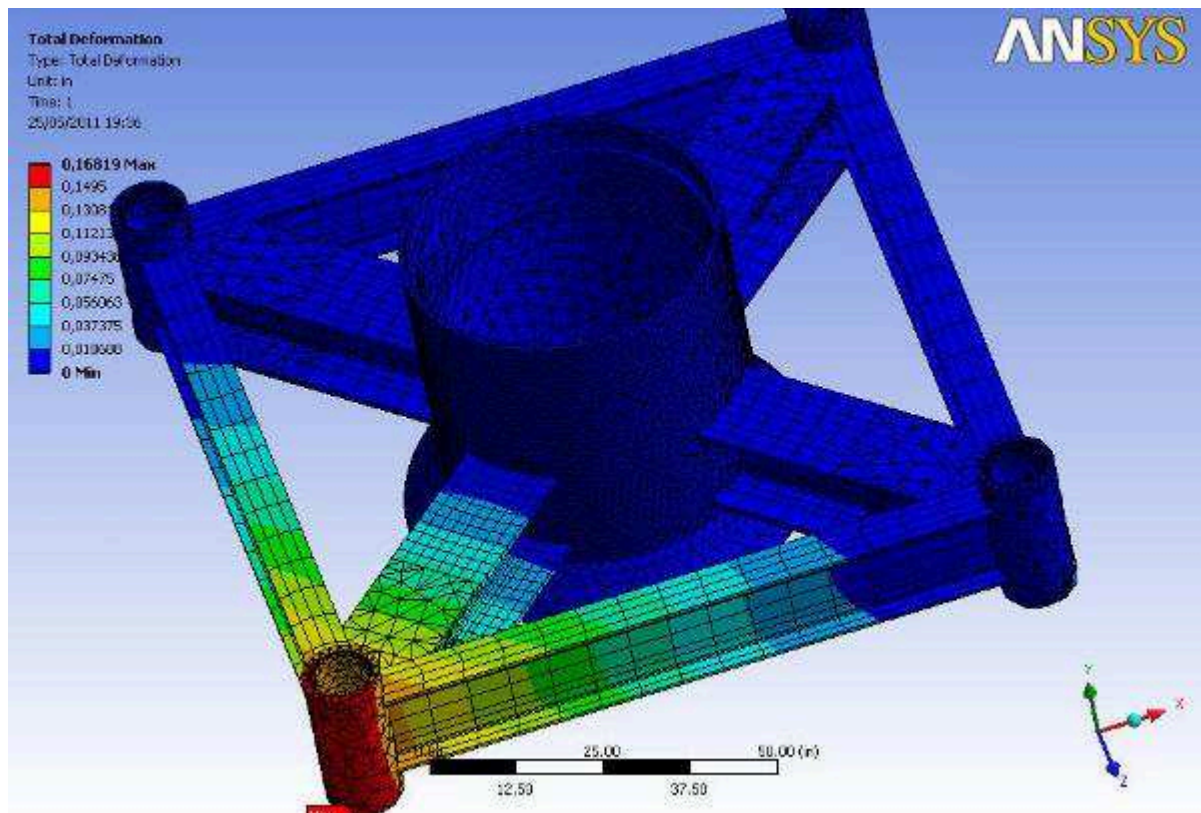


Figura 25 – Deslocamento pela carga vertical no terceiro modelo.

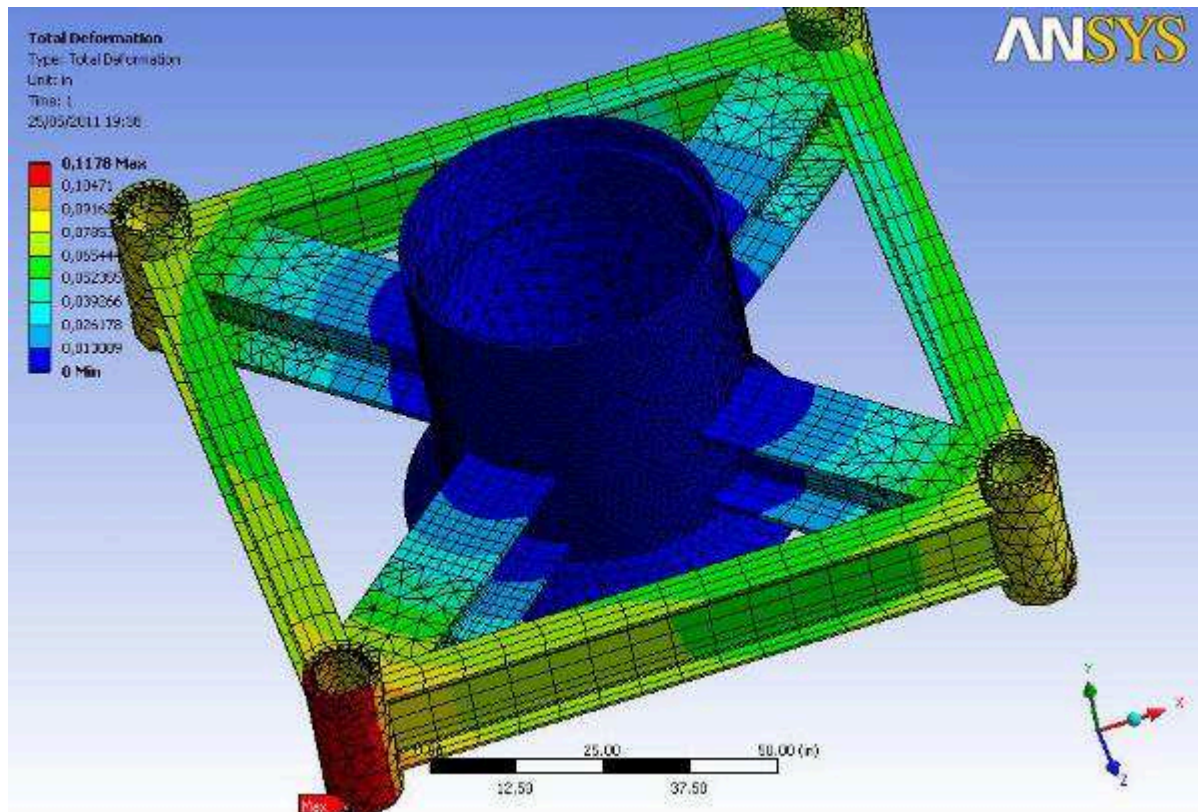


Figura 26 – Deslocamento pela carga horizontal no terceiro modelo.

Percebeu-se que a máxima tensão de von-Mises causada pela carga vertical na terceira simulação divergiu da segunda, porém ficou mais próxima da primeira e a sua localização continuou satisfatória. Então mais uma vez surgiu necessidade de que um modelo com um maior número de elementos fosse criado. Neste quarto caso foi alterado o centro de relevância geral da malha em todo o modelo, de *Coarse* para *Fine*, que passou a possuir 25.111 nós e 38.421 elementos. Os resultados obtidos com esta modificação estão apresentados nas figuras 27, 28, 29 e 30.

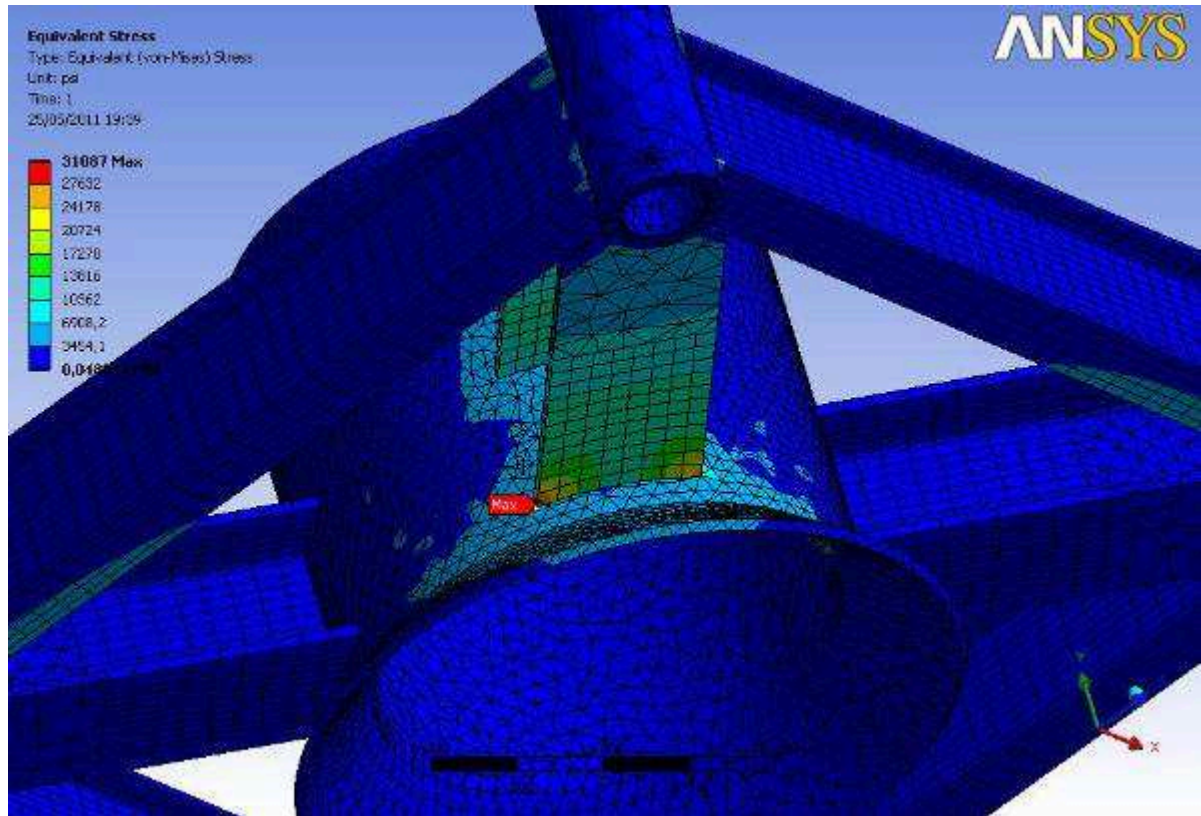


Figura 27 – Tensão de von-Mises pela carga vertical no quarto modelo.

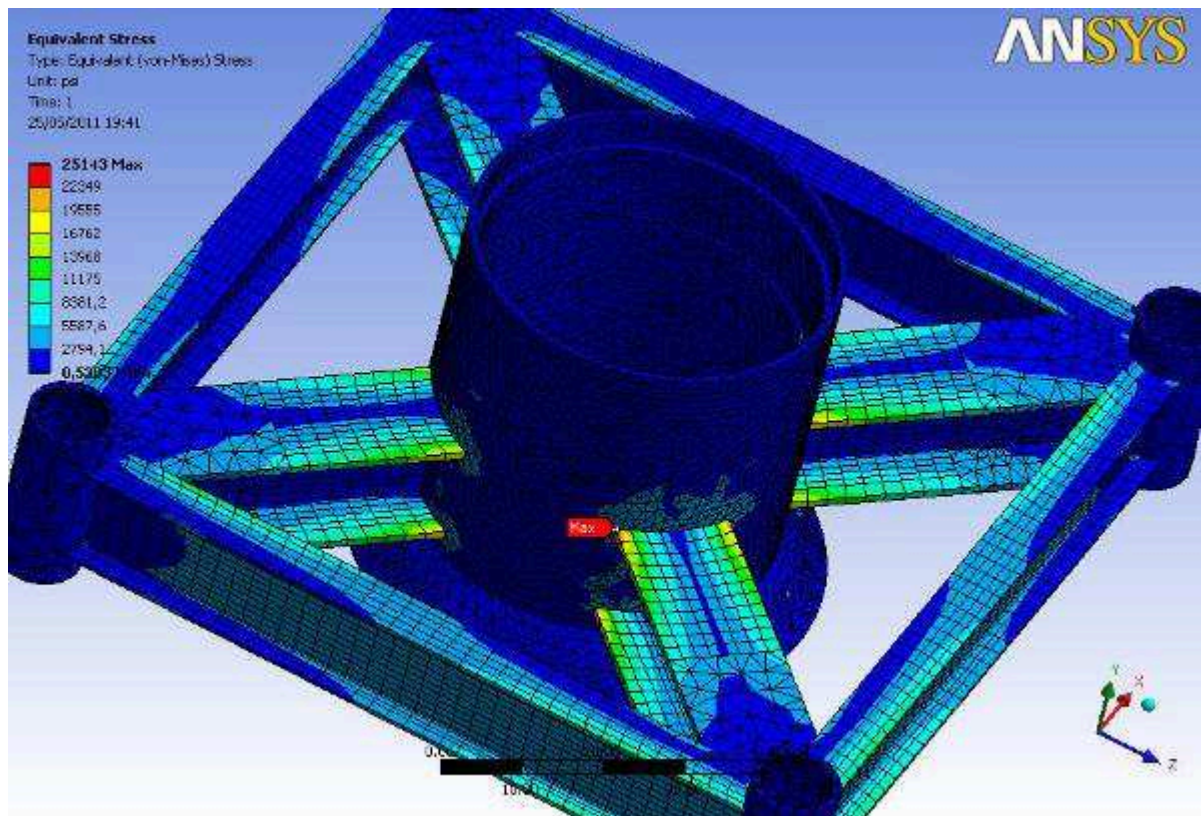


Figura 28 – Tensão de von-Mises pela carga horizontal no quarto modelo.

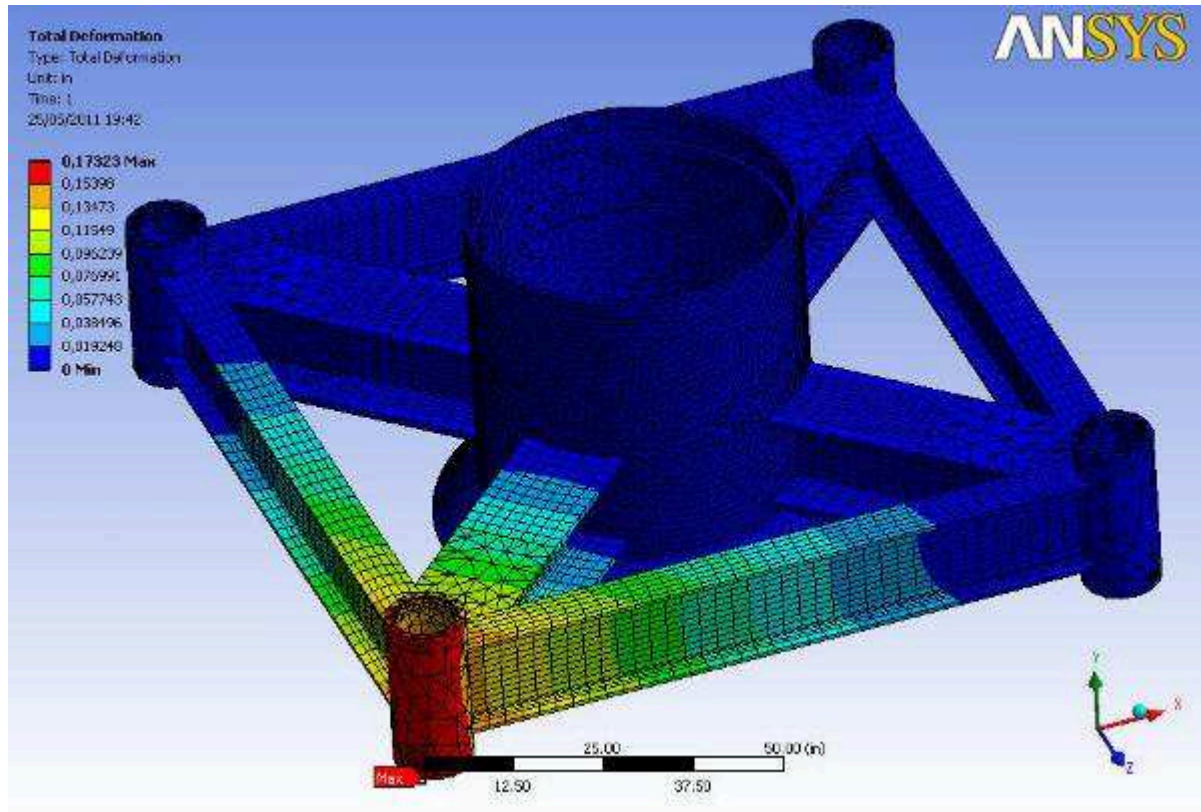


Figura 29 – Deslocamento pela carga vertical no quarto modelo.

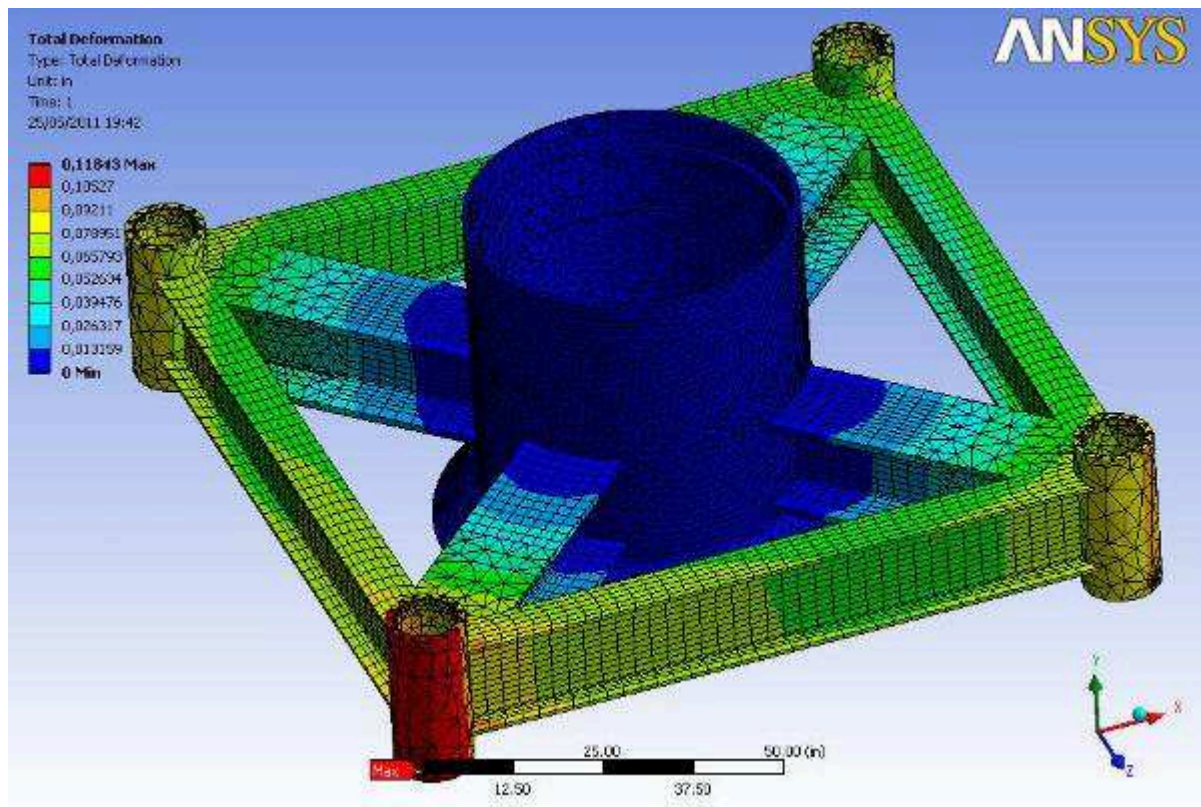


Figura 30 – Deslocamento pela carga horizontal no quarto modelo.

As máximas tensões de von-Mises devido às cargas vertical e horizontal obtidas com a quarta simulação divergiram em torno de 1.000 psi dos resultados da terceira análise, mas as localizações não apresentaram significativas alterações. E o quinto modelo foi gerado em busca de uma convergências das respostas, aplicou-se mais um refinamento na malha da viga transversal e no corpo central, reduzindo os seus elementos, que antes eram de 2” de largura e 2” de comprimento, para 1,5” de largura e 1,5” de comprimento. As respostas para esta nova condição seguem nas figuras 31, 32, 33 e 34.

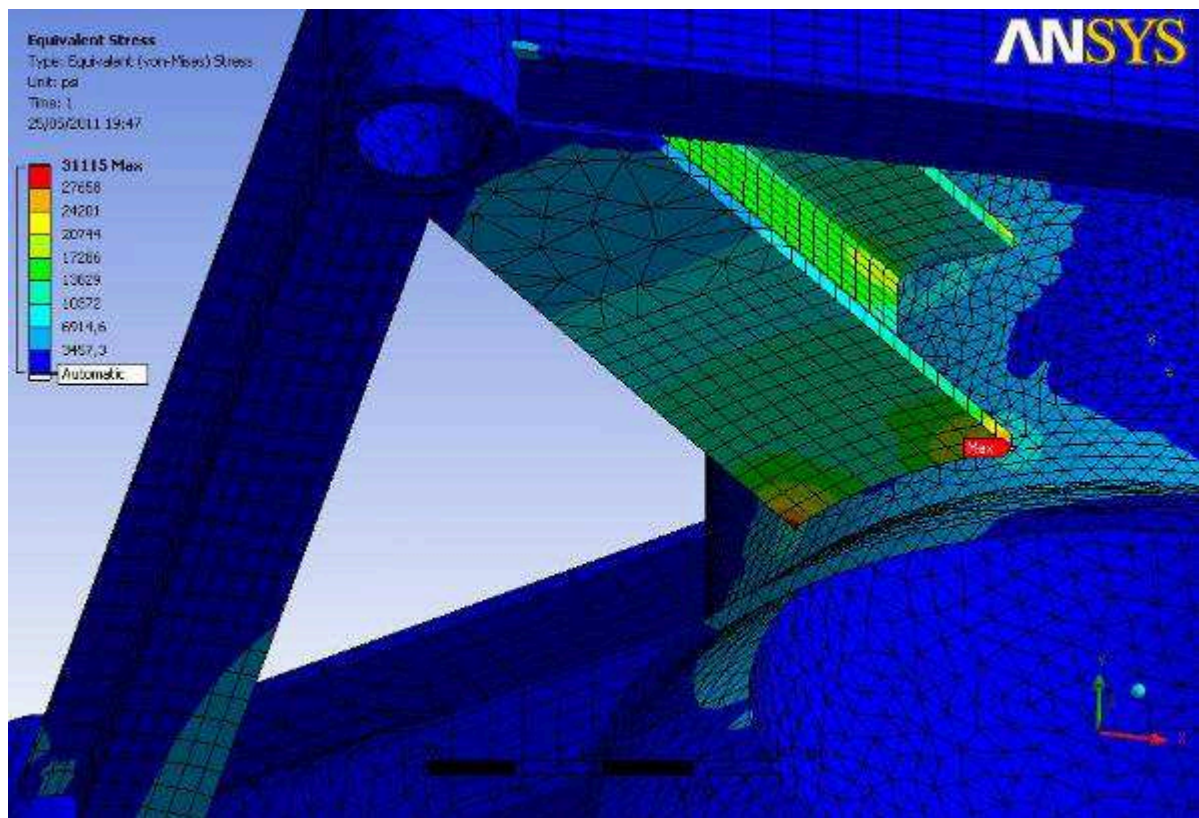


Figura 31 – Tensão de von-Mises pela carga vertical no quinto modelo.

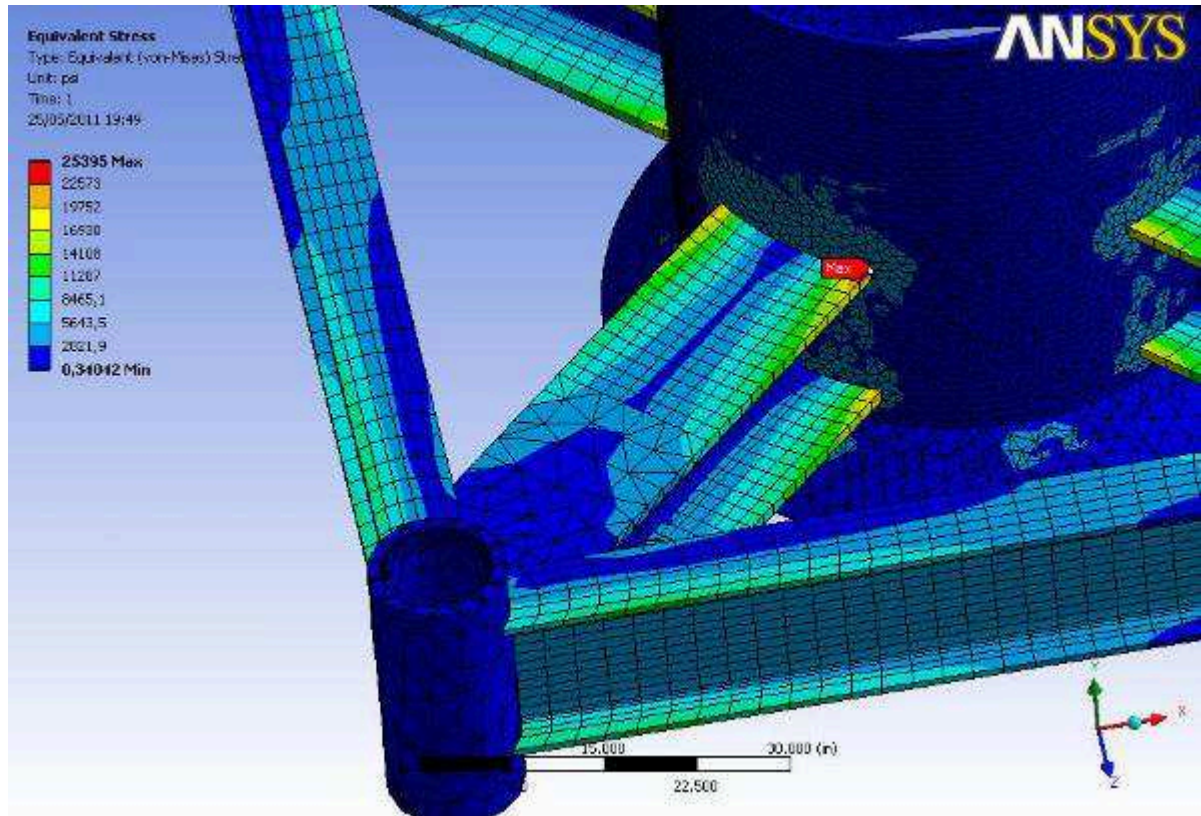


Figura 32 – Tensão de von-Mises pela carga horizontal no quinto modelo.

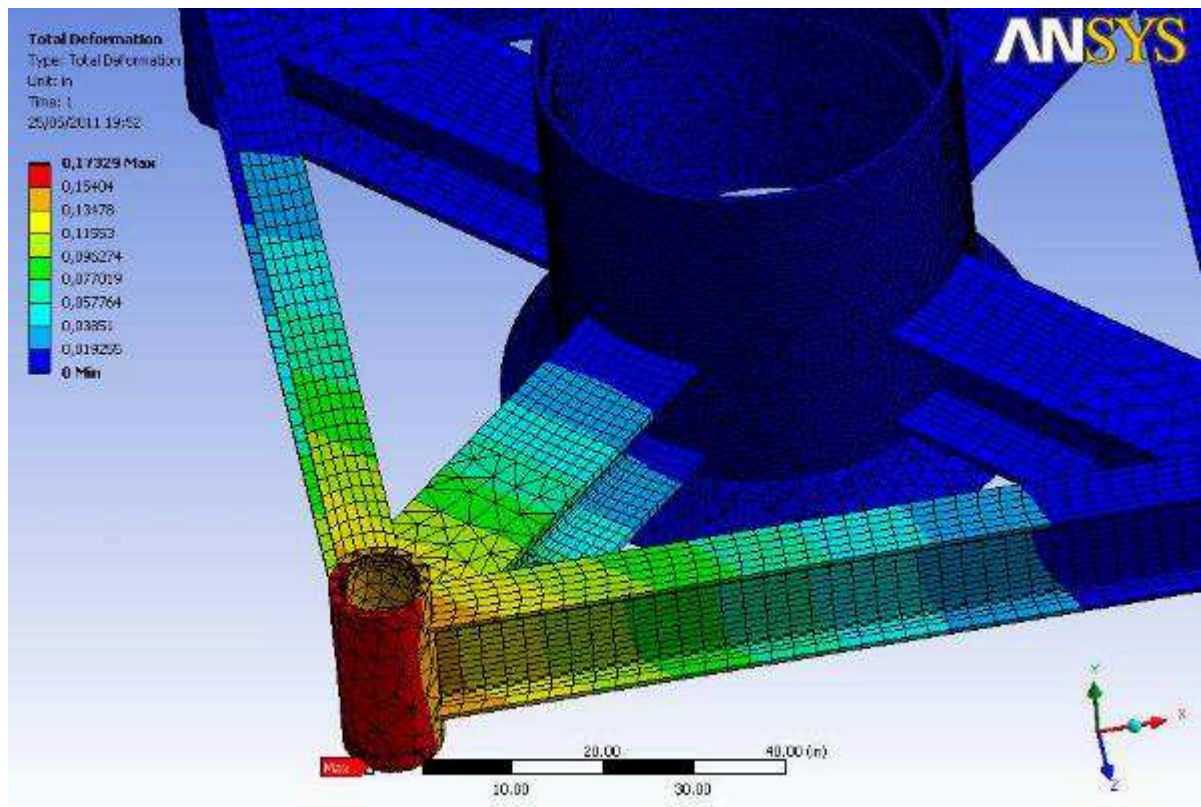


Figura 33 – Deslocamento pela carga vertical no quinto modelo.

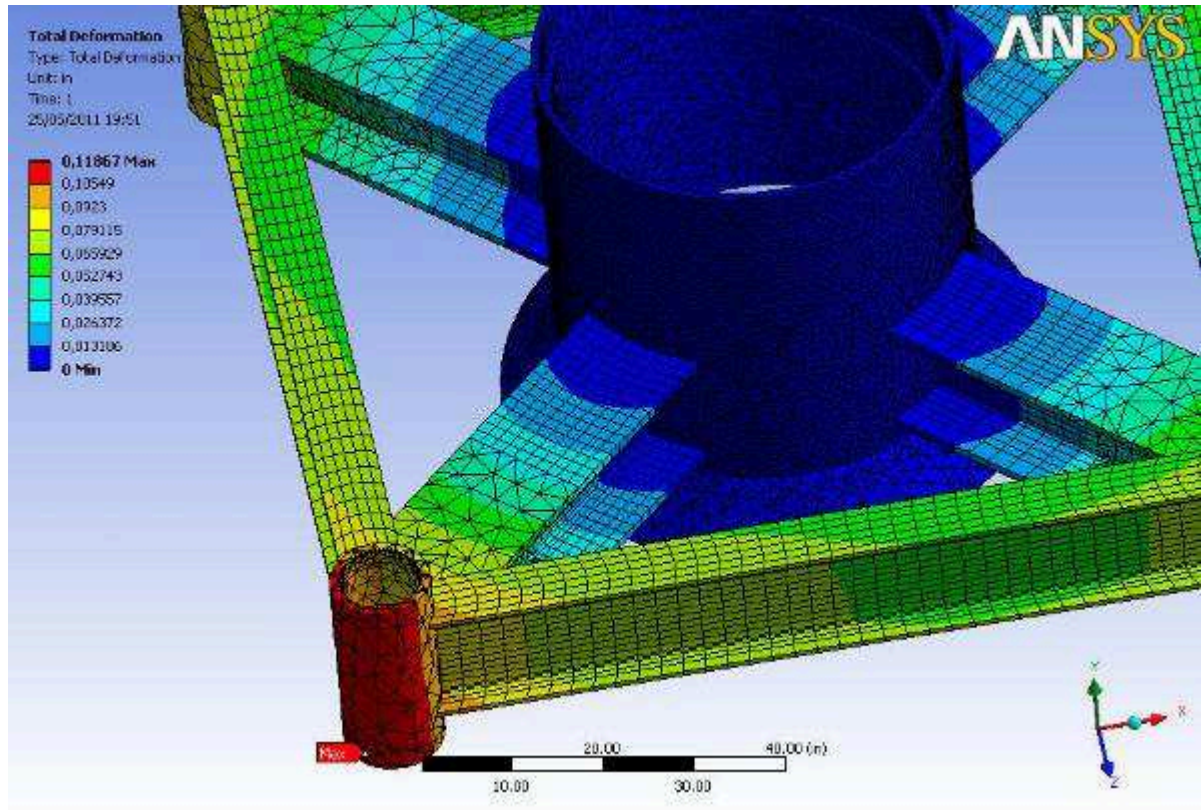


Figura 34 – Deslocamento pela carga horizontal no quinto modelo.

Desta vez, as máximas tensões de von-Mises provocadas pelas cargas vertical e horizontal ficaram muito próximas dos resultados obtidos durante a quarta tentativa e a mesma convergência foi percebida para os resultados dos deslocamentos máximos.

Para que a convergência das repostas obtidas ficasse clara, as tabelas 2 e 3 foram montadas e apresentadas abaixo, seguindo a seqüência dos experimentos e mostrando a relação destes resultados com as alterações feitas nos parâmetros da malha dos modelos de EF. As figuras 35 e 36 também auxiliam na visualização da convergência.

Tabela 2 – Qualidade da malha X Tensão de von-Mises.

Centro de Relevância	Face Sizing Corpo	Body Sizing Viga	Parâmetro de Relevância	Número de Nós	Número de Elementos	Tensão de von-Mises (vertical)	Tensão de von-Mises (horizontal)
<i>Coarse</i>	-	-	-	10.170	16.385	30.423 psi	-
<i>Coarse</i>	2,0"	2,0"	-	13.188	23.107	24.360 psi	21.398 psi
<i>Coarse</i>	2,0"	2,0"	100	14.188	26.330	32.066 psi	26.921 psi
<i>Fine</i>	2,0"	2,0"	100	25.111	38.421	31.087 psi	25.143 psi
<i>Fine</i>	1,5"	1,5"	100	27.809	44.480	31.115 psi	25.395 psi

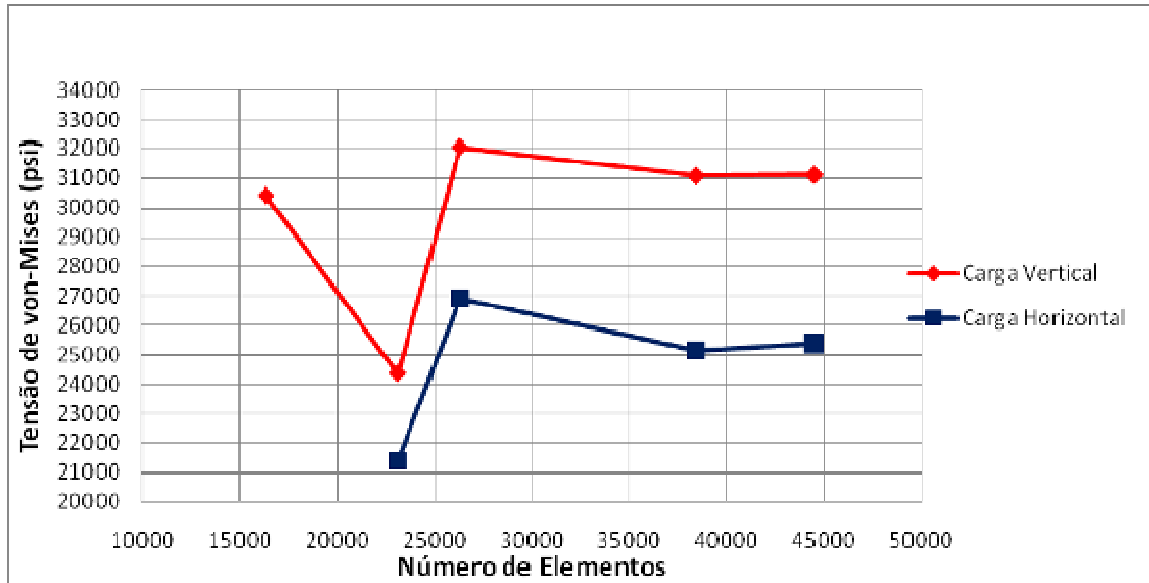


Figura 35 – Convergência dos resultados (tensão).

Tabela 3 – Qualidade da malha X Deformação.

Centro de Relevância	Face Sizing Corpo	Body Sizing Viga	Parâmetro de Relevância	Número de Nós	Número de Elementos	Deformação (vertical)	Deformação (horizontal)
Coarse	-	-	-	10.170	16.385	0,141"	-
Coarse	2,0"	2,0"	-	13.188	23.107	0,150"	0,109"
Coarse	2,0"	2,0"	100	14.188	26.330	0,168"	0,118"
Fine	2,0"	2,0"	100	25.111	38.421	0,173"	0,118"
Fine	1,5"	1,5"	100	27.809	44.480	0,173"	0,119"

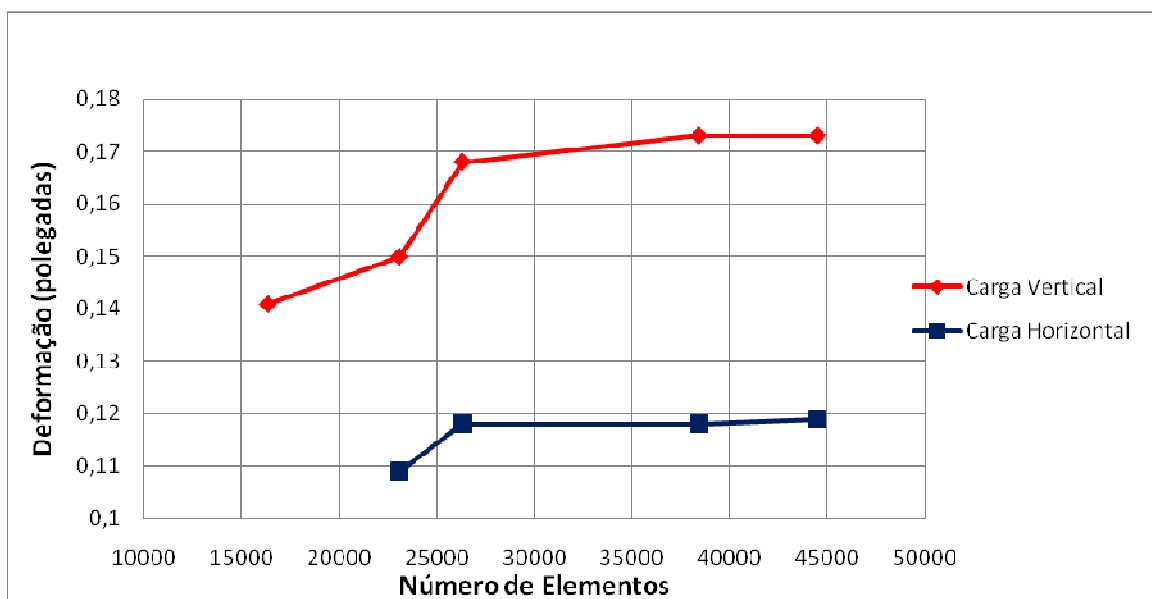


Figura 36 – Convergência dos resultados (deformação).

4.2 Cálculo dos valores admissíveis

Com base nos dados de material e características geométricas apresentadas no capítulo 3, em conjunto com a formulação colocada no capítulo 2, foram calculados os valores admissíveis para a tensão de von-Mises e para a deflexão conforme demonstrado a seguir:

De acordo com a DNV No. 2.7-3 (*Det Norske Veritas*, 2006) a tensão equivalente de von-Mises admissível s_e é definida por:

$$s_e = 0,85 \times C$$

Onde C é a mínima tensão de escoamento do material:

$$C = R_e = 50.000 \text{ psi}$$

Portanto, a tensão admissível calculada corresponde a:

$$s_e = 42.500 \text{ psi}$$

De acordo com a DNV No. 2.7-3 (*Det Norske Veritas*, 2006), a deflexão admissível calculada é definida por:

$$y = L_n / 250$$

Onde L_n é o maior vão livre e/ou completa distância lateral na estrutura.

$$L_n = 101.82''$$

Portanto, a deflexão admissível calculada corresponde a:

$$y = 0,407''$$

Ao se comparar os resultados obtidos pela solução do modelo final de elementos finitos, após a convergência dos resultados e segundo as condições de contorno previamente descritas, percebe-se que nenhuma das tensões equivalentes de von-Mises excederam os valores admissíveis calculados acima. Isto prova que a estrutura inferior da base guia submarina, resiste às forças vertical e horizontal, devido a máxima tensão admissível de escoamento do aço utilizado ser superior às tensões provocadas por estas forças. Esta comparação pode ser observada a seguir na tabela 4.

Tabela 4 – Comparativo de Tensões.

Direção do Carregamento	Força	Tensão Máxima de von-Mises	Tensão Admissível
Vertical	75,000 lbf	31,115 psi	42,500 psi
Horizontal	100,000 lbf	25,395 psi	

Bem como as tensões, os valores finais máximos de deformação encontrados ficaram abaixo do valor esperado, segundo o critério da norma DNV No. 2.7-3 (*Det Norske Veritas*, 2006) e o comparativo segue abaixo na tabela 5.

Tabela 5 – Comparativo de Deformações.

Direção do Carregamento	Força	Deformação Máxima	Deformação Admissível
Vertical	75,000 lbf	0,173"	0,407"
Horizontal	100,000 lbf	0,119"	

4.3 Cálculo das cargas máximas admissíveis

Tendo-se em vista que o carregamento considerado resultou em valores de tensão equivalente de von-Mises e deformação muito inferiores aos valores admissíveis, novas simulações foram realizadas para se determinar qual seriam as máximas cargas as quais a estrutura resistiria. Para isso, o último modelo de elementos finitos foi re-submetido a novos carregamentos de maior magnitude e os resultados foram comparados com os valores admissíveis ao final de cada simulação. Este processo foi repetido até que as cargas horizontais e verticais aplicadas fossem capazes de produzir valores de tensão e deformação

próximos dos limites admissíveis especificados na norma DNV No. 2.7-3 (*Det Norske Veritas*, 2006).

As cargas finais aplicadas foram de 102.000 lbf na direção vertical e 167.000 lbf na horizontal com as mesmas condições de fixação anteriormente utilizadas, que podem ser observadas nas figuras 37 e 38. E os resultados para máxima tensão de von-Mises e deslocamento estão apresentados nas figuras 39, 40, 41 e 42.

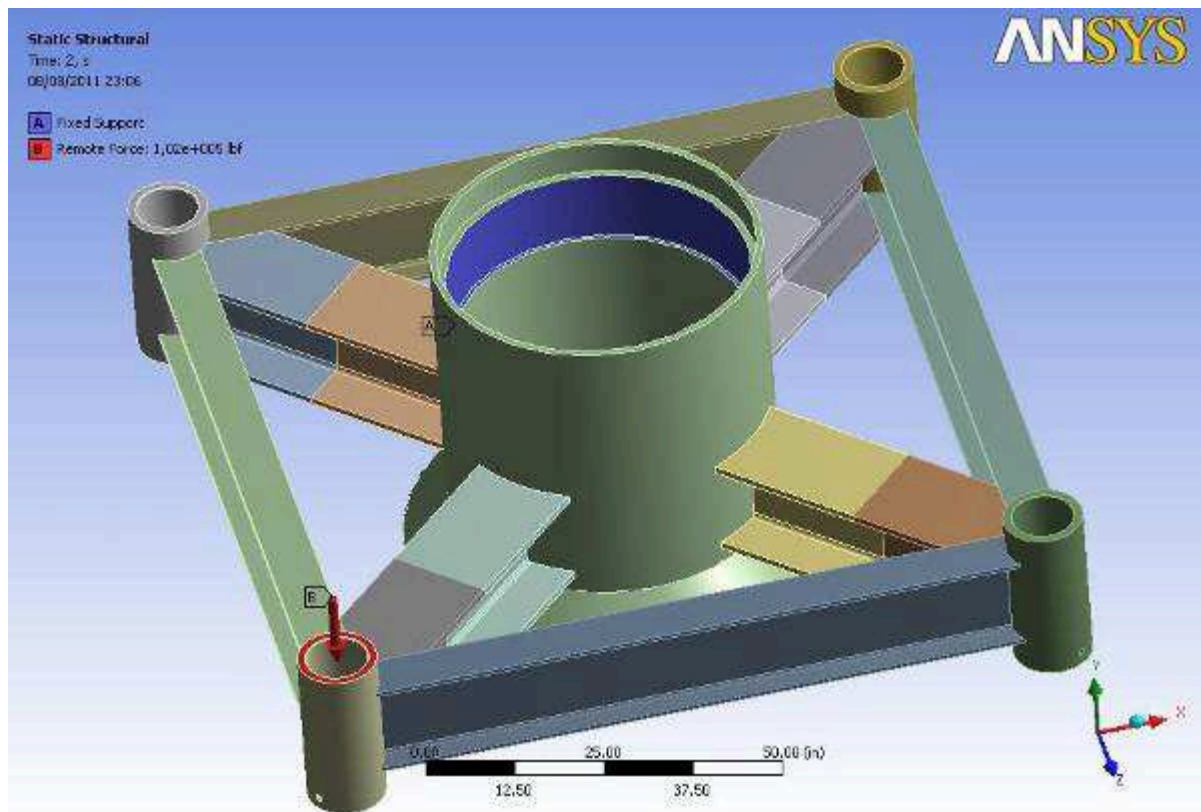


Figura 37 – Fixação e carga vertical máxima

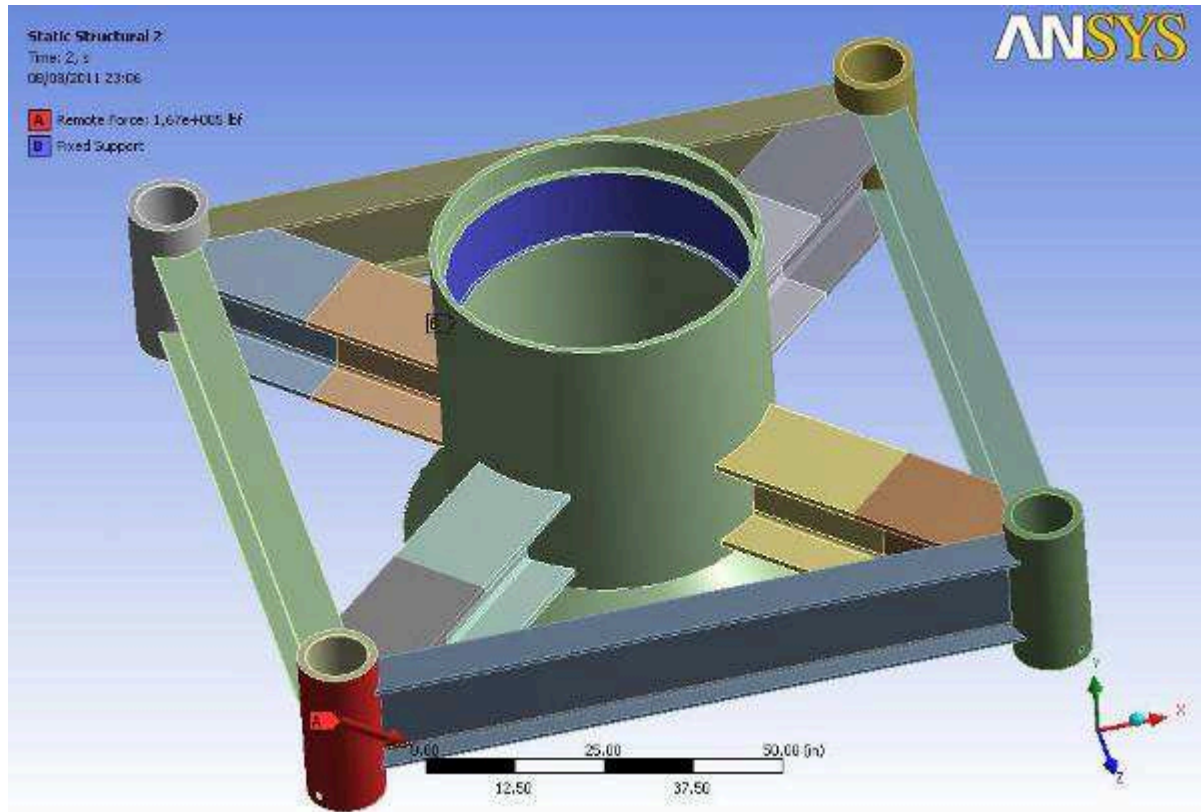


Figura 38 – Fixação e carga horizontal máxima

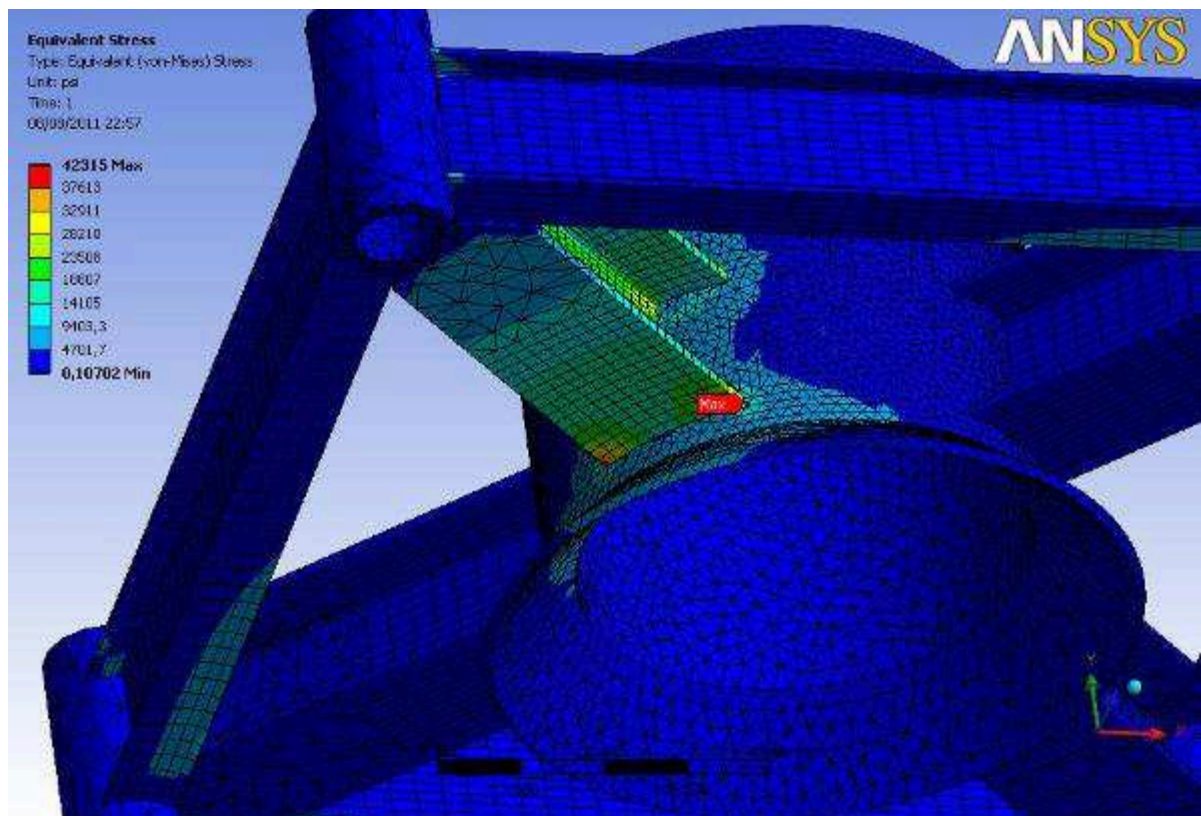


Figura 39 – Tensão de von-Mises pela carga vertical máxima

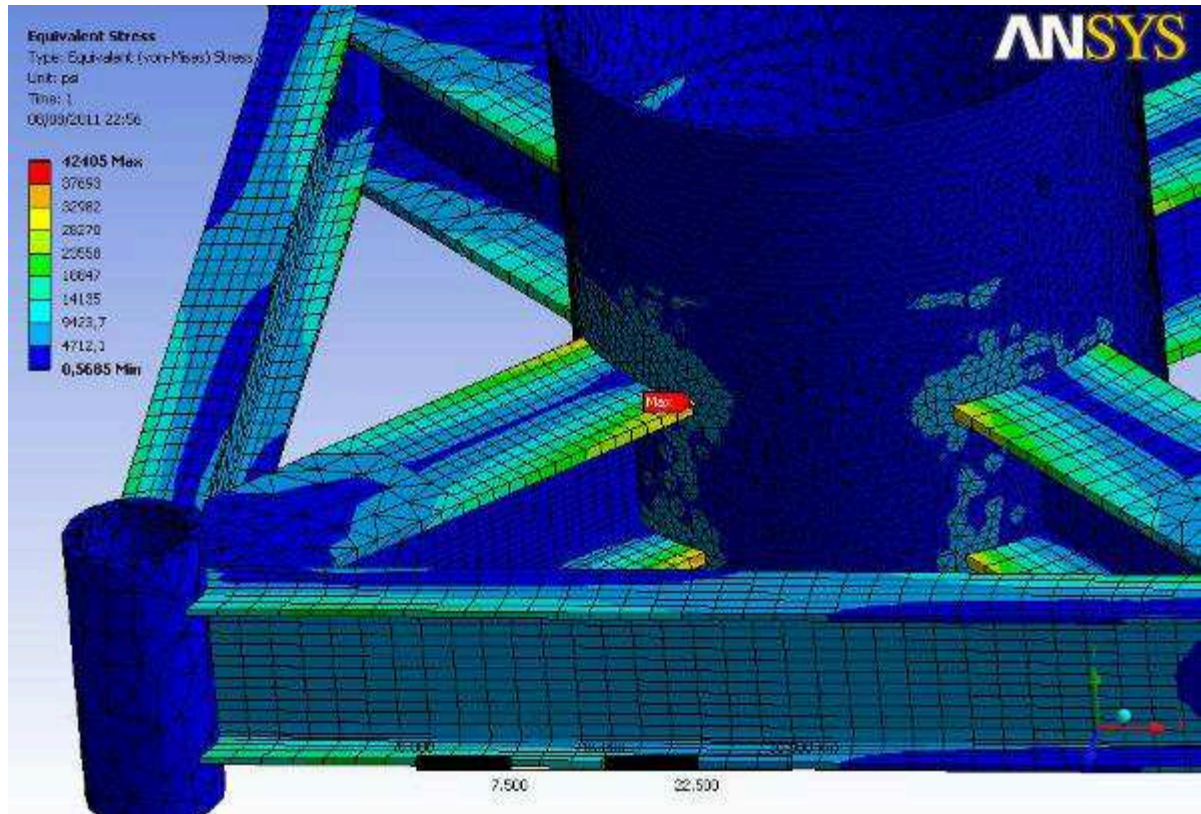


Figura 40 – Tensão de von-Mises pela carga horizontal máxima

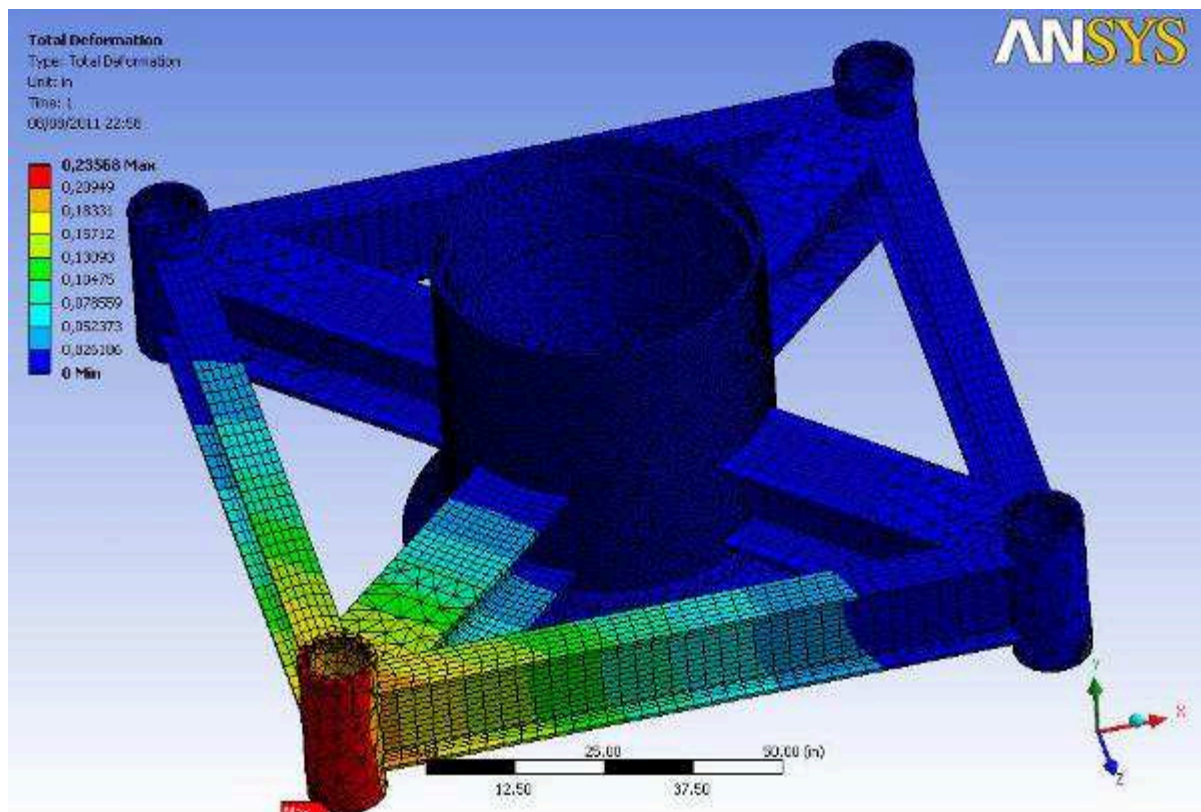


Figura 41 – Deslocamento pela carga vertical máxima

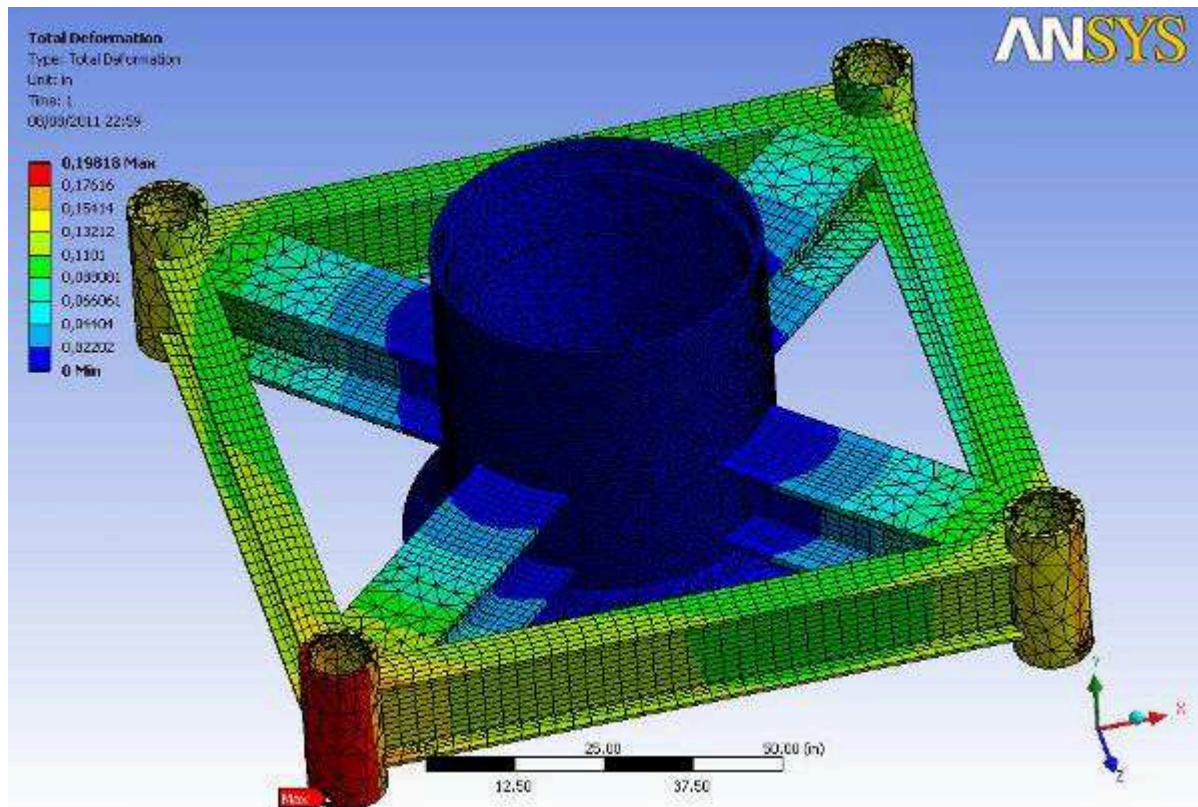


Figura 42 – Deslocamento pela carga horizontal máxima

As tabelas 6 e 7 abaixo consolidam os resultados de tensão e deformação obtidos para os máximos carregamentos e prova que também estão em acordo com os limites admissíveis calculados anteriormente.

Tabela 6 – Comparativo de Tensões (máxima carga).

Direção do Carregamento	Força	Tensão Máxima de von-Mises	Tensão Admissível
Vertical	102,000 lbf	42,315 psi	42,500 psi
Horizontal	167,000 lbf	42,405 psi	

Tabela 7 – Comparativo de Deformações (máxima carga).

Direção do Carregamento	Força	Deformação Máxima	Deformação Admissível
Vertical	102,000 lbf	0,236"	0,407"
Horizontal	167,000 lbf	0,198"	

Todos os parâmetros das simulações e respostas obtidas com o último modelo de elementos finitos e as máximas cargas admissíveis estão também descritos no ANEXO B – Relatório de solução do ANSYS, gerado pelo próprio programa.

5.0 Conclusões e Sugestões para trabalhos futuros

Este trabalho apresentou uma proposta para o cálculo de uma base guia submarina utilizando o método dos elementos finitos. Foi desenvolvido um modelo tridimensional da estrutura no *software* de modelagem Autodesk Inventor® Professional 2010 que foi exportado para o *software* ANSYS® *Workbench* 2011 onde foram gerados os modelos de elementos finitos das análises. Uma pesquisa diagnóstica, com abordagem quantitativa e exploratória, foi, então, conduzida por meio de sucessivos refinamentos das malhas, que foram aplicados nos pontos de interesse dos modelos para a obtenção de uma convergência dos resultados.

A análise pelo método dos elementos finitos possibilitou identificar não só os elementos mais solicitados da estrutura como, também, demonstrar que a estrutura da base guia submarina resistiu aos esforços aplicados, pois os resultados obtidos não excederam aos limites especificados na DNV No. 2.7-3 (*Det Norske Veritas*, 2006).

E, ao se determinar os máximos carregamentos suportados pela estrutura, também percebemos que horas de engenharia em projetos similares poderão ser poupadas, visto que a capacidade do equipamento é agora conhecida.

Pode-se concluir com a análise dos resultados apresentados que, ao refinar-se a malha de um modelo de elementos finitos, ou seja, ao se reduzir o tamanho dos seus elementos nos pontos de interesse, que os valores máximos para tensão equivalente de von-Mises e deformação variam bastante. Além disso, a repetição deste processo levou a uma convergência dos resultados, isto é, que mesmo reduzindo-se o número de elementos do modelo, os resultados não variavam mais significativamente.

Notou-se que a distribuição de tensões ocorreu de forma aceitável, visto que uma concentração de tensões era esperada nestes locais devido à geometria da viga. Isto evidenciou que a análise representou com fidelidade o comportamento da estrutura inferior da base guia quando sujeita aos esforços de instalação e operação.

É importante salientar que o refinamento da malha usualmente resulta em valores mais altos de tensão, mesmo que os resultados das análises venham a convergir após várias tentativas. Isto pode ser uma preocupação quando se está analisando estruturas com cantos vivos.

Por isso, uma sugestão para trabalhos futuros seria a de modelar, também, a geometria do filete de solda, mesmo sem considerar as tensões residuais do processo de soldagem, pois acredita-se que isso melhoraria a distribuição de tensões pela estrutura.

Outra sugestão para trabalhos futuros seria a de conduzir uma análise dinâmica, pelo método dos elementos finitos, considerando os efeitos hidrodinâmicos provocados pela movimentação do mar, pois estes efeitos também estão presentes durante a operação da base guia submarina e justificariam este tipo de análise.

6.0 Referências

- ALVES, R. **Técnicas de CAD**: Apostila Departamento de Expressão Gráfica. Rio de Janeiro: Universidade Federal do Rio de Janeiro, 2002.
- AMERICAN PETROLEUM INSTITUTE. **API Specification 17D**: Specification for Subsea Wellhead and Christmas Tree Equipment. 1.ed. Dallas, 1992.
- ANDERL, R.; MENDGEN, R. Parametric Design and its Impact on Solid Modeling Applications. **Proceedings of the third ACM symposium on Solid modeling and application**, Salt Lake City, May 1995.
- ANSYS Workbench, Release 11.0: Documentation for ANSYS Workbench. [S.I.]: ANSYS Inc., 2007. 1 CD-ROM.
- AZEVEDO, A.F.M. **Método dos Elementos Finitos**. 1.ed. Porto: Universidade do Porto, 2003.
- BEER, F. P.; JOHNSTON, E. R.; DEWOLF, J. T. **Resistência dos Materiais**. 4.ed. São Paulo: MacGraw-Hill, 2006.
- BRITISH STANDARD. **BS EN 10025**: European Structural Steel Grades S355JR, S355JO, and S355J2G3, 2003.
- CODA, H. B. A solid-like FEM for geometrically non-linear 3D frames. **Elsevier Comput. Methods Appl. Mech. Engrg.** **198**, São Carlos, 2009.
- CHARNEY, F. A.; PATHAK R. Sources of elastic deformations in steel frame and framed-tube structures: Part 2: Detailed subassemblage models. **Elsevier Journal of Constructional Steel Research** **64**, Blacksburg, p. 101-117, 2008.
- DET NORSKE VERITAS. **DNV Standard for Certification No. 2.7-3**: Portable Offshore Units, 2006.
- DE MATOS, G. B. *et al.* Modelamento numérico de um cilindro do tipo 2 para armazenamento de GNV. **Revista Matéria**, Volta Redonda, v. 13, n. 1, p. 136-146, 2008.

- DOUDOUMIS, I. N. Finite element modeling and investigation of the behaviour of elastic infilled frames under monotonic loading. **Elsevier Engineering Structures** **29**, Thessaloniki, p. 1004-1024, 2007.
- FARROKHI, H.; DANESH, F.; ESHGHI, S. A modified moment resisting connection for ductile steel frames (Numerical and experimental investigation). **Elsevier Journal of Constructional Steel Research** **65**, Tehran, p. 2040-2049, 2009.
- FILHO, A. A. **Elementos Finitos: A Base da Tecnologia CAE**. 5.ed. São Paulo: Érica, 2007.
- FOGGIATTO, J. A. *et al.* Recomendações para Modelagem em Sistemas CAD 3-D. **4º COBEF - Congresso Brasileiro de Engenharia de Fabricação**, Estância de São Pedro, Abril 2007.
- GALLAGHER, R. H. **Finite element analysis: Fundamentals**. 4.ed. Englewood Cliffs: Prentice-Hall, 1975.
- KANARACHOS, S.; DEMOSTHENOUS, G. Modeling the mechanical behavior of composite metal plastic pipes subject to internal pressure and external soil and traffic loads. **Proceedings of the 5th WSEAS Int. Conf. on System Science and Simulation in Engineering**, Tenerife, p. 66-71, December 2006.
- KHEDMATI, M. R.; GHAVAMI, K.; RASTANI, M. A comparative study on three different construction methods of stiffened plates-strength behaviour and ductility characteristics. **REM: R. Esc. Minas**, Ouro Preto, v. 60, n. 2, p. 365-379, Abr./Junho 2007.
- LOTTI, S. R. *et al.* Aplicabilidade científica do método dos elementos finitos. **R Dental Ortodon Ortop Facial**, Maringá, v. 11, n. 2, p. 35-43, Mar./Abril 2006.
- MENEZES, P. V. **Metodologias de Análise e Projeto de Estruturas Reticuladas na Exploração de Petróleo Offshore**. 2007. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) - Universidade Federal do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, 2007.
- OIL & GAS FIELD TECHNICAL TERMS. Site da **OilGasGlossary.com**. Disponível em: <<http://oilgassglossary.com/?s=subsea+completion>>. Acesso em: 8 de junho de 2011.
- OLIVEIRA, E.J. **Biomecânica básica para ortodontistas**. 1.ed. Belo Horizonte: Universidade Federal de Minas Gerais, 2000.

SHIRADHONKAR, S. R.; SHRIKHANDE, M. Seismic damage detection in a building frame via finite element model updating. **Elsevier Computer and Structures**, Roorkee, 2011.

SPECK, H. J. **Proposta de método para facilitar a mudança de técnicas de projetos:** da prancheta à modelagem sólida (CAD) para empresas de engenharia de pequeno e médio porte. 2005. Tese (Doutorado em Engenharia de Produção) - Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis, 2005.

ZEID, I. **Mastering CAD/CAM**. New York: MacGraw-Hill, 2005.

ZIENKIEWICZ, O. C.; TAYLOR, R. L. **The Finite Element Method:** Volume 1 The Basis. 5.ed. Oxford: Butterworth-Heinemann, 2000.

ANEXOS

ANEXO A – Detalhamento da estrutura inferior.....	78
ANEXO B – Relatório de solução do ANSYS.....	82

ANEXO A – Detalhamento da estrutura inferior

ANEXO B – Relatório de solução do ANSYS

Autorizo cópia total ou parcial desta obra, apenas para fins de estudo e pesquisa, sendo expressamente vedado qualquer tipo de reprodução para fins comerciais sem prévia autorização do autor.

José Felipe Braz

Taubaté, setembro de 2011.