

UNIVERSIDADE TECNOLÓGICA FEDERAL DO PARANÁ

DEPARTAMENTO ACADÊMICO DE MECÂNICA

CURSO DE ENGENHARIA MECÂNICA

SUZERNANDE RIBEIRO DOS SANTOS

TIAGO JOSÉ COGO

**AUTOMATIZAÇÃO NO PROJETO DE ESTRUTURAS DE
TRANSPORTE DE EQUIPAMENTOS SUBMARINOS**

TRABALHO DE CONCLUSÃO DE CURSO

(Tcc2 - Nº de Inscrição - 23)

CURITIBA

2015

SUZERNANDE RIBEIRO DOS SANTOS

TIAGO JOSÉ COGO

**AUTOMATIZAÇÃO NO PROJETO DE ESTRUTURAS DE
TRANSPORTE DE EQUIPAMENTOS SUBMARINOS**

Monografia do Projeto de Pesquisa apresentada à disciplina de Trabalho de Conclusão de Curso - Tcc2 do curso de Engenharia Mecânica da Universidade Tecnológica Federal do Paraná, como requisito parcial para aprovação na disciplina.

Orientador: Prof. Mestre Marcelo Maldaner

CURITIBA

2015

TERMO DE ENCAMINHAMENTO

Venho por meio deste termo, encaminhar para apresentação a monografia do Projeto de Pesquisa “AUTOMATIZAÇÃO NO PROJETO DE ESTRUTURAS DE TRANSPORTE DE EQUIPAMENTOS SUBMARINOS”, realizado pelo aluno(s) SUZERNANDE RIBEIRO DOS SANTOS e TIAGO JOSÉ COGO, como requisito parcial para aprovação na disciplina de Trabalho de Conclusão de Curso - Tcc2, do curso de Engenharia Mecânica da Universidade Tecnológica do Paraná.

Orientador: Prof. Mestre Marcelo Maldaner

UTFPR - Damec

Curitiba, 22 de Setembro de 2015.

TERMO DE APROVAÇÃO

Por meio deste termo, aprovamos a monografia do Projeto de Pesquisa “AUTOMATIZAÇÃO NO PROJETO DE ESTRUTURAS DE TRANSPORTE DE EQUIPAMENTOS SUBMARINOS”, realizado pelo aluno(s) SUZERNANDE RIBEIRO DOS SANTOS e TIAGO JOSÉ COGO, como requisito parcial para aprovação na disciplina de Trabalho de Conclusão de Curso - Tcc2, do curso de Engenharia Mecânica da Universidade Tecnológica Federal do Paraná.

Prof. Mestre, Marcelo Maldaner

Damec, UTFPR

Orientador

Prof. Doutora, Ana Paula Carvalho da Silva Ferreira

Damec, UTFPR

Avaliador

Prof. Doutor, Marco Antônio Luersen

Damec, UTFPR

Avaliador

Curitiba, 22 de Setembro de 2015

RESUMO

SANTOS, Suzernande R.; COGO, Tiago J. **Automatização no projeto de estruturas de transporte de equipamentos submarinos**. 2015. 92 f. Trabalho de Conclusão de Curso (Graduação) – Curso Superior de Engenharia Mecânica. Universidade Tecnológica Federal do Paraná, Curitiba, 2015.

Estruturas de transporte são necessárias para a maioria dos equipamentos utilizados na exploração submarina de petróleo. Essas estruturas são relativamente simples, mas com grande responsabilidade e seu projeto segue determinadas normas. O presente trabalho tem como proposta desenvolver uma rotina numérica para a automatização e otimização no projeto destas estruturas para utilização em uma empresa fornecedora de equipamentos para exploração de petróleo. Pretende-se, assim reduzir o tempo de projeto, gerar padronização e redução de custos de fabricação. A automatização no projeto de estruturas de transporte é feita em um programa na linguagem C, que realiza cálculos preliminares e manda as informações para um *script* na linguagem *Phyton*. Em seguida este *script* é executado pelo *software* Abaqus® e o resultado é avaliado pelo programa em C. Em média o programa leva 27 minutos para gerar uma estrutura. O *software* SolidWorks® foi utilizado somente para gerar as estruturas em 3D quem foram comparadas com as estruturas de elementos de vigas. Portanto, para atender o dimensionamento estrutural em tempo hábil, com confiabilidade estrutural e padronização, propôs-se a automatização no projeto das estruturas de transporte a partir dos parâmetros de entrada. Onde estes parâmetros geraram informações para um programa em C++ que realiza análises de diferentes estruturas pelo Método de Elementos Finitos (MEF) no *software* Abaqus®, selecionando a melhor estrutura de forma automática.

Palavras-chave: Estruturas de transporte. Automatização. Redução de custo. Segurança.

ABSTRACT

SANTOS, Suzernande R.; COGO, Tiago J. **Automatização no projeto de estruturas de transporte de equipamentos submarinos**. 2015. 92 f. Trabalho de Conclusão de Curso (Graduação) – Curso Superior de Engenharia Mecânica. Universidade Tecnológica Federal do Paraná, Curitiba, 2015.

Transport structures are needed for most submarine equipment used in oil exploration. These structures are relatively simple, but with great responsibility and your project follows certain rules. This paper aims to develop a numerical routine for the automation and optimization of the design of these structures for use in an equipment supplier company for oil exploration. It is intended, thus reducing design time, generate standardization and reduction of manufacturing costs. Automation in transport infrastructure project is done in a program in C language, which performs preliminary calculations and sends the information to a script in Python language. Then this script is run by Abaqus ® software and the result is evaluated by the program in C. On average the program takes 27 minutes to generate a structure. SolidWorks ® software was used only to generate the 3D structures were compared with those structures beam element. Therefore, to meet the structural design in a timely manner, structural reliability and standardization, proposed to automate the design of transport infrastructure from the input parameters. Where these parameters generated information for a C ++ program that performs analysis of different structures by the Finite Element Method (FEM) in Abaqus ® software, selecting the best automatically structure.

Keywords: Transport structures. Automation. Reduced costs. Safety.

LISTA DE ILUSTRAÇÕES

Figura 1 – Elementos de uma treliça	19
Figura 2 – Treliça simples	20
Figura 3 – Treliça composta.....	20
Figura 4 – Equipamento de transporte (<i>Skid</i>).....	21
Figura 5 - Principais tipos de produtos siderúrgicos de utilização estrutural	23
Figura 6 – Classificação modelos matemáticos estruturais	24
Figura 7 – Divisão do domínio em subdomínio.....	25
Figura 8 - Carregamento no método dos elementos finitos	26
Figura 9 - Fluxograma do programa proposto neste trabalho.....	30
Figura 10 – Dimensões de entrada do <i>skid</i>	31
Figura 11 – Nomenclatura das dimensões na parte inferior do <i>skid</i>	32
Figura 12 - Posição do CG no equipamento	33
Figura 13 - Carregamento de içamento do <i>skid</i>	36
Figura 14 - Carregamento simulando o <i>skid</i> sendo levantado pela empilhadeira	36
Figura 15 - Carregamento simulando o <i>skid</i> sendo levantado pela empilhadeira por dois pontos de apoio.....	37
Figura 16 – Base da <i>skid</i> com furo na seção da viga I	44
Figura 17 – Base da <i>skid</i> sem corte na seção da viga I	45
Figura 18 – Ponto crítico da base da <i>skid</i>	46
Figura 19 - Zoom da Figura 16 mostrando o ponto de fixação do equipamento	47
Figura 20 - Zoom da Figura 16 em um dos cortes da viga em I	48
Figura 21 – Base da <i>skid</i> em elementos de viga	49
Figura 22 - Tensões simulação 1 utilizando elementos de vigas e <i>global size</i> de 0.8m	55
Figura 23 - Tensões simulação 1 utilizando elementos de vigas e <i>global size</i> de 0.001m.....	56

Figura 24 - Tensões simulação 2 utilizando elementos de vigas e <i>global size</i> de 0.4m	60
Figura 25 - Tensões simulação 2 utilizando elementos de vigas e <i>global size</i> de 0.0005 m.....	61
Figura 26 - Carregamento para elementos de viga avaliando a parte inferior do <i>skid</i> utilizando os dados do caso 1	63
Figura 27 - Carregamento para modelo 3D avaliando a parte inferior do <i>skid</i> utilizando os dados do caso 1	64
Figura 28 - Tensões na parte inferior utilizando elementos de vigas com dados do caso 1	65
Figura 29 - Tensões na parte inferior utilizando modelo 3D com dados do caso 1 ...	66
Figura 30 - Tensões na parte inferior utilizando modelo 3D com zoom	67
Figura 31 - Carregamento para parte superior utilizando elementos de vigas	68
Figura 32 - Carregamento para parte superior utilizando modelo 3D	68
Figura 33 - Tensões na parte superior utilizando elementos de vigas com dados do caso 1	69
Figura 34 - Tensões na parte superior utilizando modelo 3D com dados do caso 1 .	70
Figura 35 - Carregamento do <i>skid</i> sendo levantado por uma empilhadeira com dados do caso 1 utilizando elementos de vigas	71
Figura 36 - Carregamento do <i>skid</i> sendo levantado por uma empilhadeira com dados do caso 1 utilizando modelo 3D	72
Figura 37 - Tensões do <i>skid</i> sendo levantado por uma empilhadeira com dados do caso 1 utilizando elementos de vigas	73
Figura 38 - Tensões do <i>skid</i> sendo levantado por uma empilhadeira com dados do caso 1 utilizando modelo 3D	74
Figura 39 - Tensões do <i>skid</i> sendo levantado por uma empilhadeira com dados do caso 1 utilizando modelo 3D com zoom	75
Figura 40 - Carregamento da caso 3 utilizando elementos de vigas	78

Figura 41 – Tensões considerando o momento e utilizando elementos de vigas com dados do caso 3.....	79
Figura 42 – Tensões utilizando elementos de vigas e considerando o momento no ponto de fixação com dados do caso 1	80
Figura 43 – Carregamento do <i>skid</i> sendo levantado por uma empilhadeira com dados do caso 3 utilizando elementos de vigas	81
Figura 44 – Tensões do <i>skid</i> sendo levantado por uma empilhadeira com dados do caso 3 utilizando elementos de vigas.....	82
Figura 45 - Carregamento do <i>skid</i> sendo levantado por uma empilhadeira com dados do caso 3 utilizando elementos de vigas.....	83
Figura 46 - Tensões do <i>skid</i> sendo levantado por uma empilhadeira com dados do caso 3 utilizando elementos de vigas.....	84
Figura 47 - Resultado da caso 4 com o <i>skid</i> sendo içado	87

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 – Categorias dos aços-carbonos	22
Tabela 2 – Propriedades dos aços estruturais	22
Tabela 3 – Dados de entrada do programa	34
Tabela 4 – Dados da simulação da base do <i>skid</i>	44
Tabela 5 - Dados de entrada da caso 1	52
Tabela 6 - Resultado da caso 1	53
Tabela 7 - Dados de entrada da caso 2	58
Tabela 8 - Resultados da caso 2.....	59
Tabela 9 - Dados de entrada caso 3	76
Tabela 10 - Resultado da caso 3.....	77
Tabela 11 - Dados de entrada da simulação 4	85
Tabela 12 - Resultados da caso 4.....	86

LISTA DE ABREVIATURAS, SIGLAS E ACRÔNIMOS

ABNT	Associação Brasileira de Normas Técnicas
API	American Petroleum Institute
ASTM	American Society for Testing and Materials
CAD	Computer Aided Design
CAE	Computer Aided Engineering
CG	Centro de Gravidade
MAG	Metal Active Gas
MEF	Método dos Elementos Finitos
MIG	Metal Inert Gas
TIG	Tungsten Inert Gas

LISTA DE SÍMBOLOS

b	Número de barras
CGE_x	Posição do centro de massa do equipamento no eixo x
CGE_y	Posição do centro de massa do equipamento no eixo y
CGE_z	Posição do centro de massa do equipamento no eixo z
CG_x	Centro de gravidade combinado na direção x
CG_y	Centro de gravidade combinado na direção y
CG_z	Centro de gravidade combinado na direção z
d_1	Distância do olhal ao vértice mais distante
D_{emp}	Distância entre as vigas da pega da empilhadeira
E	Módulo de elasticidade
Emp_1	Maior distância da viga de referência das empilhadeiras
Emp_2	Menor distância da viga de referência das empilhadeiras
FAD	Fator de amplificação dinâmica
FH	Força horizontal aplicada no <i>skid</i>
FS	Fator de segurança
F_x	Força aplicada no ponto de fixação do equipamento no <i>skid</i> na direção x
F_y	Componente y da força aplicada no olhal
F_z	Componente z da força aplicada no olhal
g	Aceleração da gravidade
$GlobalSize$	Tamanho da malha dos elementos finitos
h	Tamanho dos elementos finitos
$Massa_{equipamento}$	Massa do equipamento
M_y	Momento no eixo y
M_z	Momento no eixo z
n	Número total de nós
$Olhal$	Distancia entre o vértice o olhal deslocado
$Olhal_1$	Distância do vértice de origem dos dois olhais que estão sobre z_1
$Olhal_2$	Distância do vértice de origem dos dois olhais que estão sobre o eixo z_2
$Olhal_z$	Distância do olhal em relação ao vértice mais próximo
P	Ordem do polinômio interpolador

Pe	Peso da seção por metro na base
Pe_1	Peso da seção lateral por metro
Pe_2	Peso da seção por metro nas pegas para empilhadeira
$Perfil_{viga}$	Perfil da viga
r	Número de apoios a determinar
Re_{s_1}	Peso em cada um dos lados do <i>skid</i> localizados no plano xz .
Re_{s_2}	Peso em cada um dos lados do plano xy
<i>Tempo</i>	Tempo de simulação que o programa em C leva para gerar os resultados
X	Altura do <i>skid</i>
X_{eq}	Altura do equipamento
Y	Maior comprimento do <i>skid</i>
Y_1	Maior distância da viga de perfil I do meio com comprimento y
Y_2	Menor distância da viga de perfil I do meio com comprimento y
Y_{eq}	Maior comprimento do equipamento
Y_{eq_1}	Maior distância do ponto de fixação no eixo y
Y_{eq_2}	Menor distância do ponto de fixação no eixo y
Z	Menor comprimento do <i>skid</i>
Z_1	Maior distância da viga de perfil I do meio com comprimento z
Z_2	Menor distância da viga de perfil I do meio com comprimento z
Z_{eq}	Menor comprimento do equipamento
Z_{eq_1}	Maior distância do ponto de fixação no eixo z
z_{eq_2}	Menor distância do ponto de fixação no eixo z
ν	Coefficiente de Poisson
θ	Ângulo das forças aplicadas no olhal em relação a vertical
σ_{esc}	Tensão de escoamento
$\sigma_{esc_{inf}}$	Tensão de escoamento parte inferior do <i>skid</i>
$\sigma_{esc_{sup}}$	Tensão de escoamento parte superior do <i>skid</i>

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO	15
1.1	Contexto do Tema	15
1.2	Caracterização do Problema	15
1.3	Objetivos	16
1.3.1	Objetivo Geral	16
1.3.2	Objetivo Específico	16
1.4	Justificativa	16
1.5	Conteúdo ou Etapas do Trabalho	17
2	FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA	18
2.1	Análise Estrutural	18
2.2	Estrutura metálica	21
2.3	Método dos Elementos Finitos	23
2.4	Software Abaqus®	27
3	PROCEDIMENTOS METODOLÓGICOS	29
3.1	Descrição da Metodologia	29
3.1.1	Entrada de dados	31
3.1.2	Cálculos necessários para o modelo no Abaqus®	35
3.1.3	Informações do <i>script</i> transcritas para a linguagem <i>Python</i>	43
3.1.4	Simulação no Abaqus®	43
3.1.5	Análise dos resultados	49
3.2	Justificativa da Metodologia	50
3.3	Produtos do Projeto	50
4	RESULTADOS	52
4.1	Testes de Malhas referentes ao caso 1	52
4.2	Testes de Malha Referentes ao caso 2	57
4.3	Simulações Utilizando o Resultado do caso 1	62
4.4	Caso 3	75
4.5	Caso 4	84
	CONCLUSÕES	88
	REFERÊNCIAS	90
	ANEXO A – PERFIS METÁLICOS TIPO “W”	92

1 INTRODUÇÃO

1.1 Contexto do Tema

No campo da exploração de petróleo são utilizados diversos equipamentos complexos e de alto custo, que devem ser transportados por navios e/ou por meio terrestre. Estes equipamentos se dividem em *offshore* (equipamentos utilizados para prospecção, extração e exploração de petróleo em alto mar) e *onshore* (mesma utilização que os equipamentos *offshore*, no entanto, em terra). Para realizar o transporte destes equipamentos são normalmente utilizadas estruturas metálicas de transporte, chamadas de *skid*. Como os equipamentos geralmente são grandes e pesados, estes *skids* devem ser robustos. Sendo necessária, assim como todo sistema de içamento, a realização de um projeto estrutural criterioso por questão de segurança.

No presente trabalho é explorada, a partir de estudos na área da mecânica estrutural, a automatização dos cálculos estruturais dos *skids* de transporte. Afim de gerar redução de custos, padronização e segurança no transporte destes equipamentos.

1.2 Caracterização do Problema

O presente trabalho tem como finalidade resolver o atual problema de tempo gasto e também falta de padronização no projeto de estruturas metálicas, que aumentam as chances de erro e conseqüentemente risco de segurança, em uma indústria fornecedora de equipamentos submarinos para extração de petróleo.

Com a aplicação deste método de automatização, realiza-se padronização nos projetos dos *skids* e também diminui-se o tempo de projeto, que influi diretamente no custo final do mesmo, juntamente com uma estrutura aprimorada e confiável.

Atualmente realizam-se projetos estruturais de acordo com projetos anteriores, ocorrendo em alguns casos, projetos superdimensionados ou subdimensionados. No caso de estruturas subdimensionadas, coloca-se em risco o equipamento transportado e também das pessoas envolvidas no transporte. Já estruturas superdimensionadas aumentam o custo do projeto.

1.3 Objetivos

1.3.1 Objetivo Geral

O presente Trabalho de Conclusão de Curso tem por finalidade desenvolver um método para automatização no projeto de estruturas de transporte, para obter-se estruturas padronizadas e aprimoradas. Com menor tempo de projeto e menor custo de fabricação.

1.3.2 Objetivo Específico

Elaborar um programa na linguagem C++ para automatizar os projetos de estruturas de transporte, realizando simulações de maneira automática no *software* Abaqus ® e analisando estes resultados, de forma a escolher a melhor estrutura possível.

1.4 Justificativa

O presente trabalho contribuirá de maneira significativa para a redução de custo, padronização, agilidade e maior segurança de projetos de estruturas de transporte em uma empresa que fornece equipamentos submarinos. Conforme já mencionado, os projetos são feitos com base em projetos anteriores e verificados utilizando o *software* Abaqus ® manualmente, e muitas vezes ocorrem

superdimensionamento ou subdimensionamento dos *skids* de transporte, podendo acarretar em alto custo, ou em uma falha estrutural. Com a utilização do *software* em C++, os *skids* suportarão os esforços sem estarem superdimensionados.

Além disso, o programa padronizará as estruturas de transporte e diminuirá o tempo de projeto, sendo que não será necessário recalculá-las sucessivamente, para se chegar a um resultado satisfatório. Dessa forma, o projetista poderá deixar o computador calculando e realizar outras funções dentro da empresa.

1.5 Conteúdo ou Etapas do Trabalho

No capítulo 1, que é a introdução, do presente trabalho é apresentado o contexto do trabalho, com dados, fatos e referências que caracterizam o problema. O capítulo 2 traz a fundamentação teórica, que apresenta de forma geral as definições, conceitos e informações das bibliografias relevantes e relacionadas ao tema do projeto. O capítulo 3, procedimentos metodológicos, mostra como o projeto será executado, fazendo a apresentação e descrição dos métodos, técnicas, ferramentas e materiais a serem utilizadas para desenvolver o trabalho e resolver o problema apresentado. No capítulo 4 são apresentados os resultados gerados pelo atual trabalho.

2 FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA

2.1 Análise Estrutural

Análise estrutural é a parte da Mecânica que avalia os esforços e deformações que as estruturas estão submetidas.

As estruturas são formadas por um ou mais elementos, interligados entre si, e assim gerando um conjunto capaz de receber esforços externos, onde encontrarão seu sistema em equilíbrio. Para tal, as grandezas fundamentais são a força e o momento (SÜSSEKIND, 1979, p. 1).

No espaço, uma translação pode ser expressa por suas componentes em cada eixo do plano tridimensional e, uma rotação resultante de três rotações, cada uma em torno de um desses eixos. Assim uma estrutura no espaço tridimensional possui um total de seis graus de liberdade (3 rotações e 3 translações). Para obtenção de equilíbrio estático, os graus de liberdade precisam ser restringidos por apoios, de modo a evitar qualquer movimento (SÜSSEKIND, 1979, p. 16).

Se os apoios são exatamente necessários para conter todos os movimentos da estrutura, a mesma é dita isostática. Ocorrendo uma situação de equilíbrio estável. Caso os apoios são em número inferior ao necessário para impedir todos os movimentos possíveis da estrutura, a estrutura é hipostática, portanto, instável. Ainda, se os apoios são em número superior ao necessário para restringir todos os movimentos da estrutura, a mesma será dita hiperestática, continuando o equilíbrio a ser estável (SÜSSEKIND, 1979, p. 23).

Dentro na análise estrutural existem diversos tipos de estruturas, porém, será dada atenção somente às treliças. Segundo Meriam (2009, p. 127) “treliça é uma estrutura formada de elementos unidos em suas extremidades para formar uma estrutura rígida”. As treliças devem ser contraventadas para restringir o movimento e dar estabilidade. A Figura 1 apresenta a nomenclatura dos elementos de uma treliça plana.

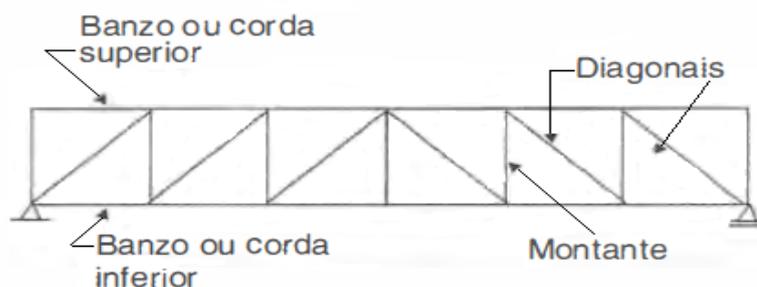


Figura 1 – Elementos de uma treliça

Fonte: Adaptado de Pfeil; Pfeil 2009

Os contraventamentos podem ser horizontais, no plano do banzo inferior, ou verticais fazendo ligações entre as colunas. No entanto, ambos distribuem as cargas horizontais devido às ações do vento na estrutura. O contraventamento vertical reduz a flambagem lateral das vigas (PEDREIRA, 2012, p. 7).

As treliças podem ser classificadas referente à estaticidade ou quanto à lei de formação. Em relação a estaticidade, a treliça pode ser classificada como hipostática, isostática ou hiperestática.

De acordo com Süsserkind (1979, p. 192) “as incógnitas do problema são em número de $(r+b)$, sendo r o número de reações de apoio a determinar e b o número de barras (e, portanto, o número de esforços normais a determinar) e as equações de equilíbrio em número igual a $2n$, sendo n o número total de nós, incluindo os nós de apoio da estrutura (pois cada nó nos dá duas equações da Estática, correspondentes ao equilíbrio de um ponto material)”.

Ainda com relação à estaticidade, podem ocorrer três casos:

1º) $r+b < 2n$: a treliça é dita hipostática, onde o número de incógnitas é superior ao de equações.

2º) $r+b = 2n$: condição necessária, mas não suficiente de tratar-se de uma treliça isostática, no entanto, pondera-se afirmar isto somente após a análise dos apoios externos e da lei de formação interna da treliça analisada.

3º) $r+b > 2n$: condição necessária, mas não suficiente de tratar-se de uma treliça hiperestática. De fato, se for hiperestática seu grau será $(r+n-2n)$.

Referente à lei de formação, as treliças podem ser classificadas em simples, composta e complexa. Às treliças simples, que são treliças isostáticas obtidas unidas duas a duas barras, a partir de nós já existentes para outros novos nós (SÜSSEKIND, 1979, p. 191). A Figura 2 apresenta uma treliça simples.

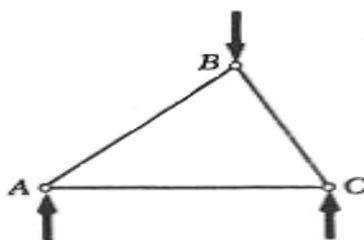


Figura 2 – Treliça simples

Fonte: Beer; Johnston Jr, 1994

A treliça composta é obtida pela ligação de duas treliças simples por três barras não paralelas nem concorrentes no mesmo ponto (SÜSSEKIND, 1979, p. 231). A Figura 3 mostra uma treliça composta.

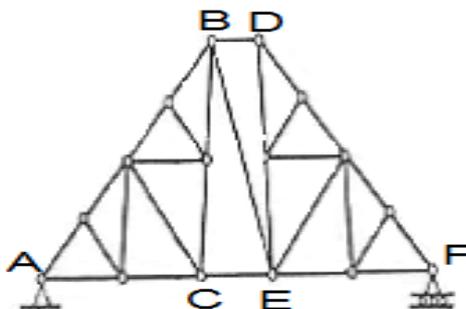


Figura 3 – Treliça composta

Fonte: Beer; Johnston Jr, 1994

Quando uma treliça não se classifica nem como simples ou compostas, esta é chamada de treliça complexa (SÜSSEKIND, 1979, p. 241).

Os elementos estruturais mais usados são vigas perfil em I ou em U, cantoneiras e barras. Quando os elementos de treliça estão no mesmo plano, a mesma é denominada treliça plana. A treliça espacial é o equivalente tridimensional da treliça plana (MERIAM, 2009, p. 127). O equipamento de transporte utilizado no

atual trabalho, também conhecido como *skid*, está representado na Figura 4, onde suas laterais são exemplo de treliça espacial.

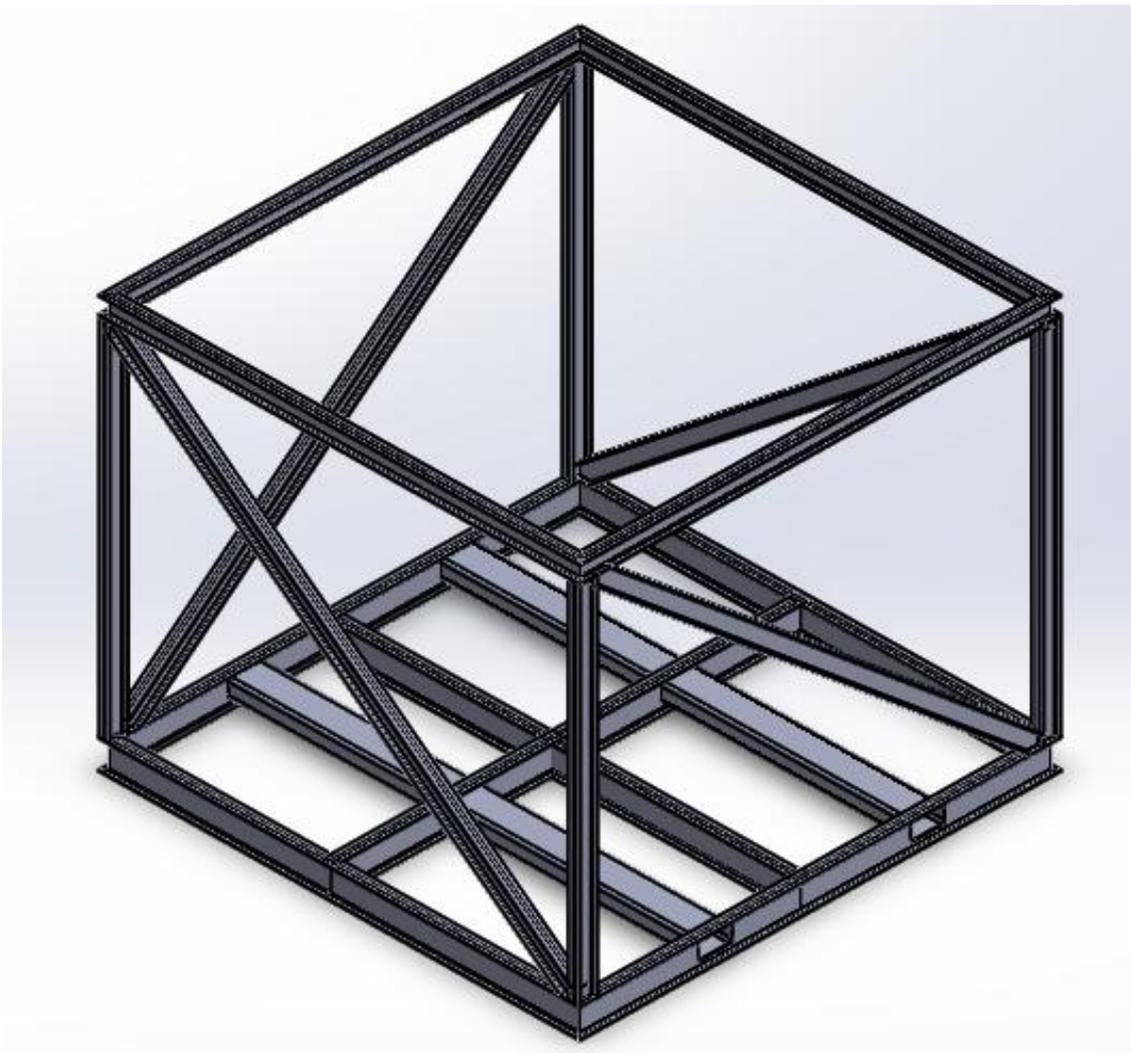


Figura 4 – Equipamento de transporte (*Skid*)

Fonte: Autoria própria

2.2 Estrutura metálica

Os aços estruturais são classificados de acordo com a composição química, sendo divididos em dois grupos: aços-carbonos e aços de baixa liga. Os dois tipos podem receber tratamentos térmicos, e assim podendo mudar as suas propriedades

mecânicas. Os aços-carbonos são os tipos mais usados e divididos em três categorias de acordo com a Tabela 1 (PFEIL; PFEIL, 2009, p. 9).

Tabela 1 – Categorias dos aços-carbonos

Baixo carbono	$C < 0,29\%$
Médio carbono	$0,30\% < C < 0,59\%$
Alto carbono	$0,60\% < C < 2\%$

Fonte: Adaptado de Pfeil; Pfeil, 2009

A Tabela 2 apresenta as propriedades dos aços estruturais.

Tabela 2 – Propriedades dos aços estruturais

Constante Física	Valor
Módulo de deformação longitudinal, E	200000-210000 MPa
Coeficiente de Poisson, ν	0,3
Coeficiente de dilatação térmica, β	12×10^{-6} por $^{\circ}C$
Massa específica, ρ	$7850 \frac{kg}{m^3}$

Fonte: Adaptado de Pfeil; Pfeil, 2009

As estruturas metálicas são produzidas com diversos formatos, como por exemplo: chapas, barras, perfis laminados, tubos, entre outros. A Figura 5 mostra os principais tipos de perfis de produtos siderúrgicos laminados de utilização estrutural.

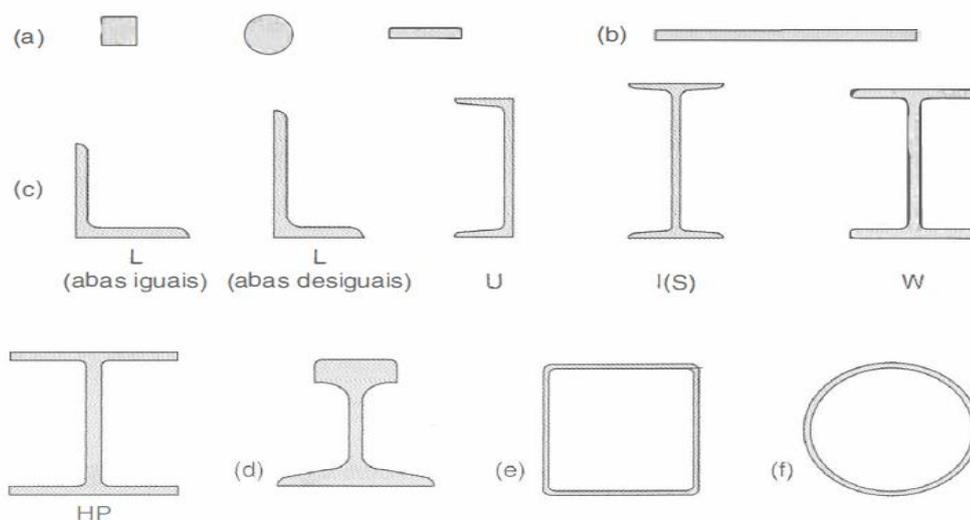


Figura 5 - Principais tipos de produtos siderúrgicos de utilização estrutural
 Fonte: Pfeil; Pfeil, 2009

2.3 Método dos Elementos Finitos

Solucionar problemas descritos a partir de equações diferenciais por meio de métodos analíticos para geometrias arbitrárias é quase impossível. Para uma aproximação numérica, com a qual essas equações diferenciais parciais podem ser resolvidas de modo aproximado, utiliza-se o método dos elementos finitos (MEF). Dessa forma, o MEF é uma importante ferramenta da engenharia, pois torna possível resolver problemas que só poderiam ser solucionados com a utilização de métodos prático. A ideia básica do MEF é dividir o corpo em elementos finitos, conectados por nós, e gerar uma malha de elementos finitos chegando a uma solução aproximada do problema (FISH; BELYTCHKO, 2009, p. 1).

Quando a estrutura é arbitrária utilizam-se hipóteses simplificadoras para criar o modelo matemático aproximado em relação ao original, expresso por equações matemáticas. Os modelos matemáticos de carácter estrutural podem ser classificados de forma simplificada de acordo com a Figura 6 (SORIANO, 2002, p. 1).



Figura 6 – Classificação modelos matemáticos estruturais

Fonte: Soriano, 2002

Moaveni (1999, p. 6) explica que a metodologia adequada para aplicar este método é a seguinte:

i. Fase de Pré-processamento:

- Discretização do domínio em um número finito de subdomínios (elementos ou regiões), ou seja, dividir o corpo em elementos finitos, conectados por nós;
- Assumir uma função que represente o comportamento físico do Elemento;
- Desenvolver equações para cada elemento;
- Construir uma matriz global a partir da reunião dos elementos, representando totalmente o problema;
- Incluir as forças aplicadas e as condições de contorno do problema;

ii. Fase de Solução:

- Resolver um conjunto de equações algébricas com o objetivo de obter os resultados, tais como, deslocamentos dos nós, as diferentes temperaturas nos nós, entre outros.

iii. Fase de Pós-processamento:

- Obter outras informações importantes, através de cálculos adicionais se necessário, como, valores de tensões, fluxo de calor, dentre outros. Nesta fase plota-se os resultados na forma de gráficos e tabelas para serem analisados.

A discretização do domínio de interesse é representada matematicamente em elementos conectados por pontos nodais, que especificam as coordenadas no espaço condicionado pelo problema físico. A Figura 7 apresenta a divisão do domínio em subdomínio.

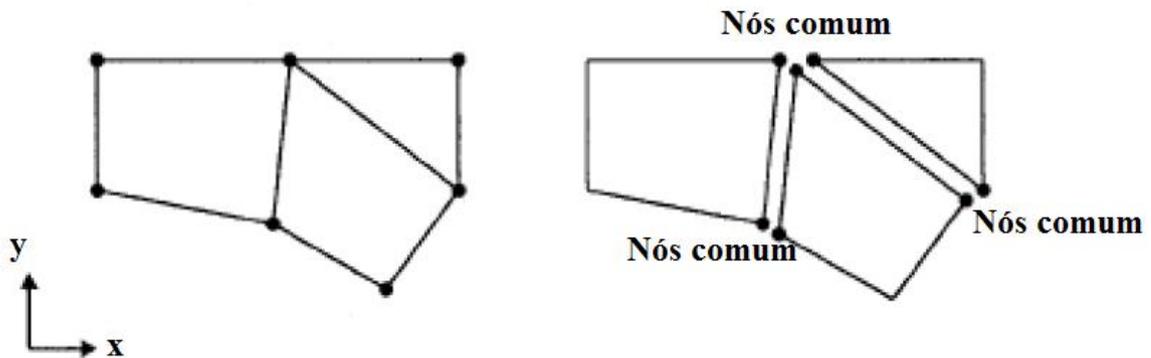
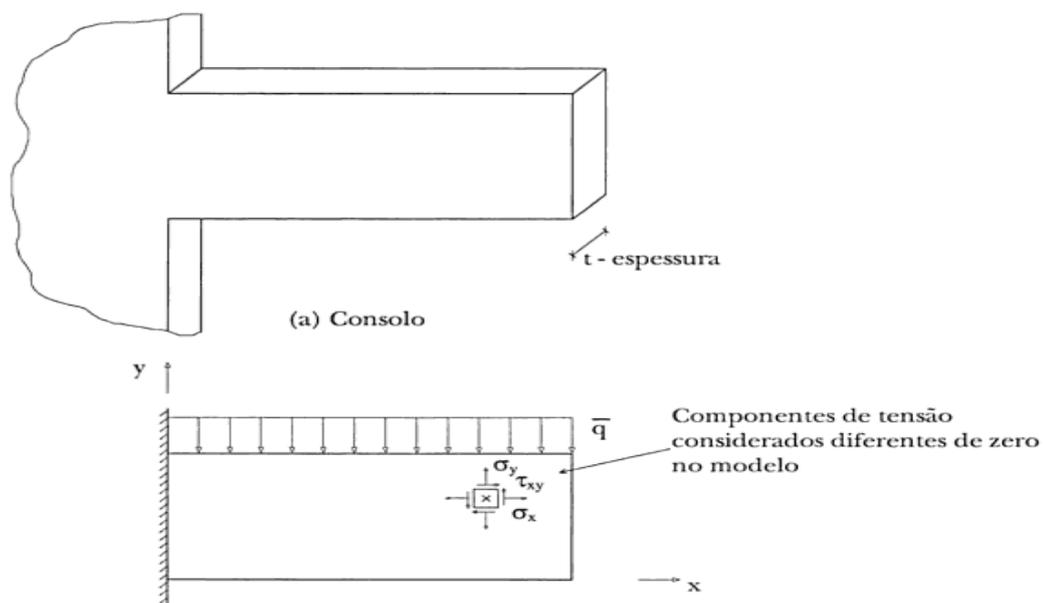


Figura 7 – Divisão do domínio em subdomínio

Fonte: Junior; Ferreira; Regnel, 2009

A Figura 8 apresenta a discretização no consolo, adotando elementos finitos retangulares onde os vértices são os pontos nodais. No método dos elementos finitos encontra-se o campo de deslocamento de cada elemento em função dos deslocamentos nodais, chamado de modelo de deslocamentos. Como consequência as componentes de tensão entre elementos adjacentes são substituídas pelo contato das forças nodais entre elementos, como ilustrado na Figura 8 (c) (SORIANO, 2002, p. 4).



(b) Esquemática do modelo matemático de estado plano de tensões, no qual se tem equilíbrio infinitesimal em cada ponto

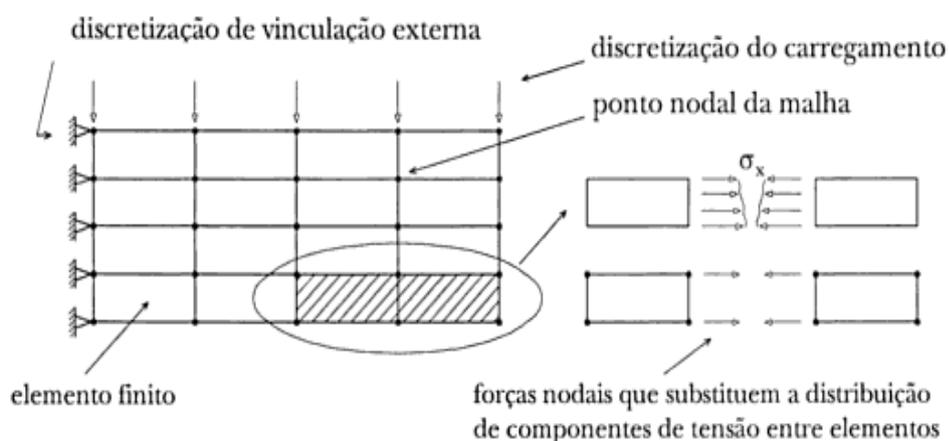


Figura 8 - Carregamento no método dos elementos finitos

Fonte: Soriano, 2002

Para melhorar o modelo matemático realiza-se refino na discretização dos elementos. Refino este que em problemas de análises não lineares ou transientes é importante, pois aproxima com maior eficiência o modelo ao problema físico. Outra forma de melhorar a modelagem do problema é utilizar computadores de última geração em problemas de elementos finitos.

Os dados mais importantes do MEF são definidos de acordo com a propriedade dos elementos que o definem. A qualidade do modelo matemático do elemento define a fórmula e o tamanho da malha utilizada (FILHO, 2007, p. 59).

As aproximações do modelo matemático do MEF podem ser melhoradas de três maneiras. A primeira é chamada de refino p , onde p diz a ordem do polinômio interpolador utilizado que será aumentado. Mas o tamanho dos elementos é fixo. A segunda faz o inverso, fixa a ordem do polinômio, mas aumenta o número de elementos finitos. Este processo é chamado de refino h , onde h o tamanho dos elementos finitos. Quanto ao último processo, melhora-se a aproximação aumentando a ordem do polinômio e reduzindo o tamanho dos elementos. Procedimento este, chamado de refino hp (TORII, 2012, p. 35).

Tradicionalmente os procedimentos de refinamento utilizados são elementos do domínio subdividido em tamanhos menores ou grau do polinômio de interpolação maior (MEIRELES, 2007, p. 6).

2.4 Software Abaqus®

O Abaqus® é um *software* comercial de elementos finitos que começou a ser desenvolvido nos anos 70 pela ABAQUS Inc., mas em 2005 a *Dassault Systèmes* adquiriu esta marca com a ideia de criar uma plataforma científica de simulação unificada (AFFONSO, 2012, p. 21). O nome do *software* Abaqus® tem origem da palavra grega *Aba-kala-culus*, que significa memória de solução (OLIVEIRA, 2010, p. 27).

É um dos programas comerciais de análise de elementos finitos mais completo para desenvolver novos projetos, compreender o comportamento de novos materiais ou simular processos de manufatura. Proporcionando soluções precisas e de alto desempenho para problemas não-lineares complexos (KOSTESKI, 2012, p. 97).

Neste programa as equações de equilíbrio são obtidas pelo princípio dos trabalhos virtuais e cada ponto material é função das coordenadas e do tempo.

Utiliza também o MEF dos deslocamentos com aproximação das condições de equilíbrio (PINHO, 2013, p. 15).

Para o processamento o Abaqus ® utiliza algoritmos específicos que permite redução de custo computacional da resolução do sistema e depois disto os resultados são armazenados num banco de dados que são acessados por módulo de pós-processo. Podem também ser acessados mediante *scripts* desenvolvidos em *Python* ou C++. Assim fornecendo informações, imagens e animações de resultados (GUERRA; CANELAS; HERSKOVITS, 2006, p. 9).

3 PROCEDIMENTOS METODOLÓGICOS

3.1 Descrição da Metodologia

Para realizar-se a automatização no projeto de estruturas de transporte, foi escrito um programa na linguagem C, que recebe os dados de entrada fornecidos pelo usuário, realiza cálculos preliminares e transcreve estas informações para um *script* na linguagem *Phyton*. Este *script* é executado pelo *software* Abaqus[®] e o resultado é analisado pelo programa em C, que se não aprovar o resultado, realiza novos cálculos preliminares e o processo se repete.

Os dados de entrada são inseridos pelo usuário, então o algoritmo do programa calculará as dimensões do *skid*, obedecendo a norma API (*American Petroleum Institute*) 17D: Projeto e operação de sistemas de produção submarina – Parte 4: *Subsea* cabeça de poço e árvore de equipamentos. Além de fazer o cálculo do CG (Centro de gravidade) total da estrutura final, que é a combinação do CG da estrutura de transporte com a do equipamento a ser transportado.

Após isto, é feito o cálculo da posição dos olhais, para que se conheçam onde as forças de içamento serão aplicadas. Este cálculo depende da posição do CG combinado, da mesma forma que o cálculo da posição das pegas para empilhadeira, que deve ter o CG o mais próximo possível do seu centro. O içamento é o caso mais crítico, pois uma descentralização pode fazer com que o conjunto seja içado de maneira não uniforme, podendo gerar problemas, como a inclinação do *skid* no momento do içamento.

Depois de realizar todos estes cálculos, são definidas as forças e momentos aplicados sobre o *skid*. Após isto, o programa em C relaciona uma seção de viga, para que possa ser realizada a simulação no *software* CAE. Dessa forma, os dados de entrada e os calculados são transcritos para um *script* que, por sua vez, será executado pelo Abaqus[®] e dá um resultado que a rotina em C avalia, determinando se o *skid* está ótimo, superdimensionado ou subdimensionado. O tamanho é considerado ótimo quando um perfil de viga, presente no banco de dados do programa, suporta o esforço e o imediatamente menos resistente não suporta. Caso

não seja alcançado um tamanho ótimo para a secção da viga, a rotina em C selecionará outra seção de viga e calculará o novo CG combinado, a nova posição dos olhais e a nova localização das pegas para empilhadeira, além das novas forças e momentos. Este processo é repetido no Abaqus® até que se chegue ao tamanho ótimo para a secção. A Figura 9 ilustra o fluxograma para automatização no projeto de estruturas de transporte.

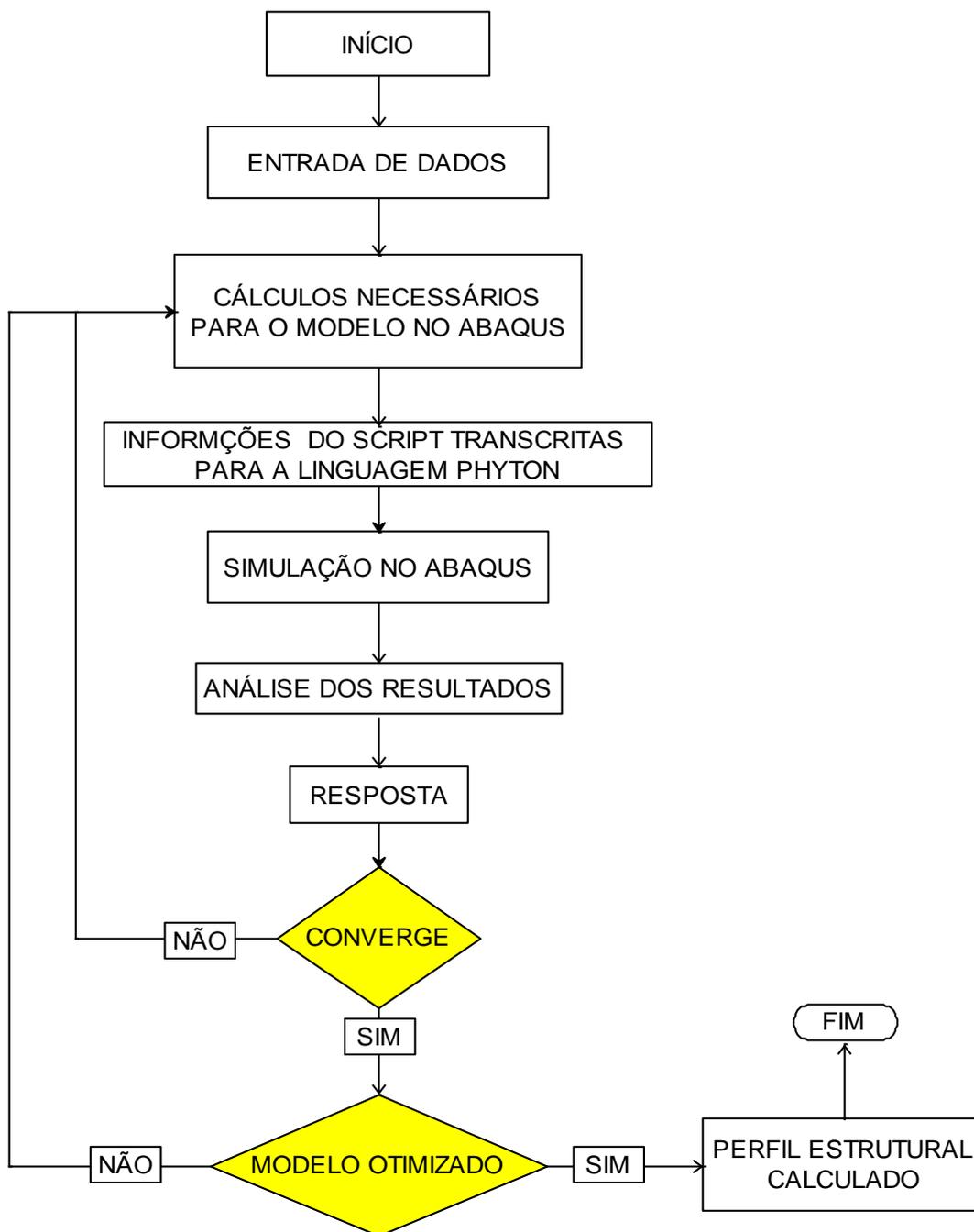


Figura 9 - Fluxograma do programa proposto neste trabalho

Fonte: Autoria própria

3.1.1 Entrada de dados

As Figura 10 e Figura 11 apresentam um desenho com as nomenclaturas de cada uma das dimensões do *skid* utilizado para fazer o transporte dos equipamentos. Estas informações são utilizadas para a realização dos cálculos estruturais. De acordo com a Figura 10 que apresenta um *skid* (com formato diferente do apresentado neste trabalho, mas que mostra como o equipamento é fixado no mesmo), e tem altura X , lados Y e Z . Sendo Z sempre maior ou igual a Y .

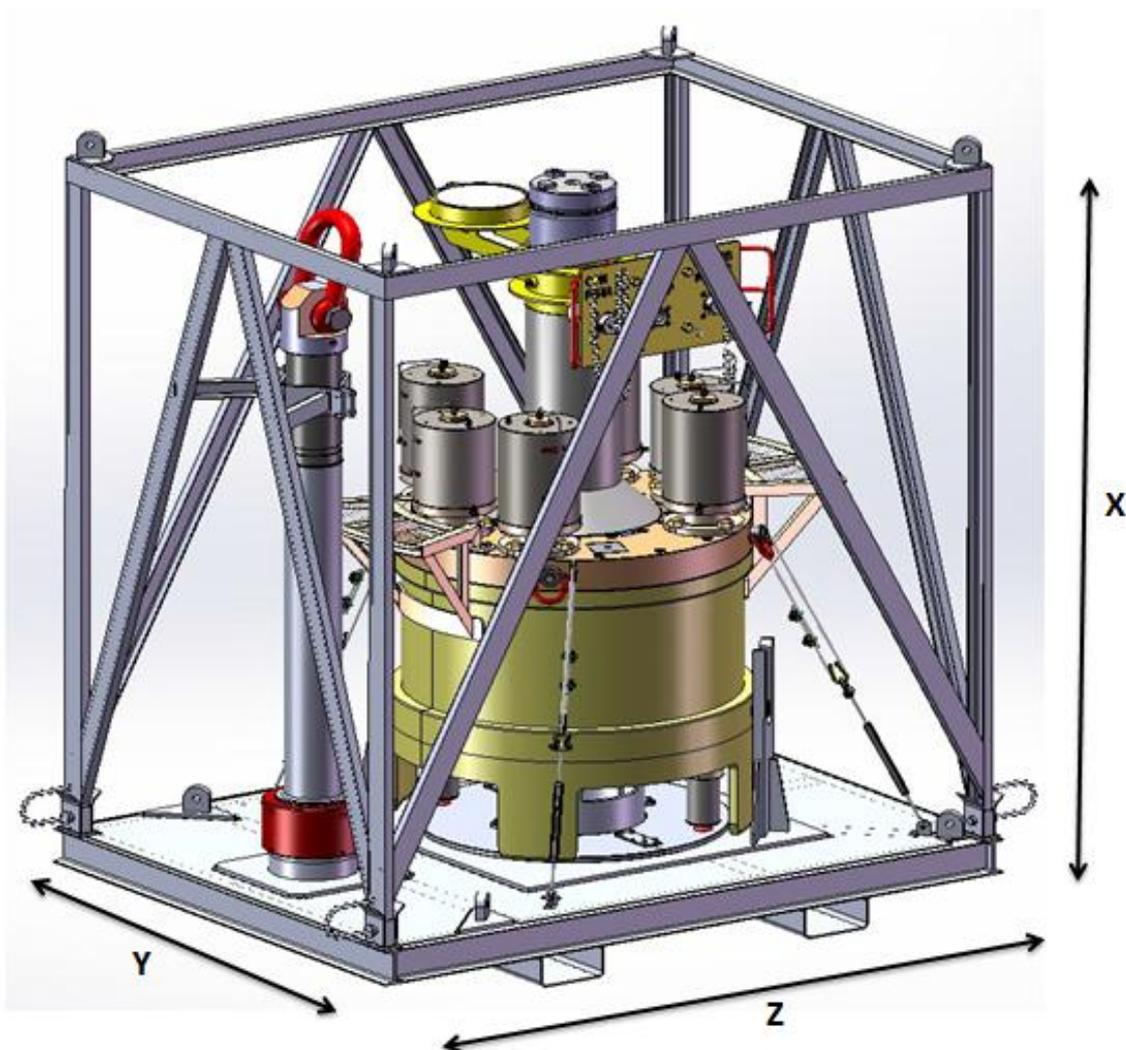


Figura 10 – Dimensões de entrada do *skid*

Fonte: Autoria própria

Na Figura 11 são mostradas as dimensões da parte inferior do *skid*, onde Y_1 é a maior distância da viga de perfil I intermediária no eixo Y , e Y_2 é a menor distância neste mesmo eixo. No eixo z , Z_1 é a maior distância da viga intermediária e Z_2 a menor. Já Emp_1 é a maior distância da viga de referência das empilhadeiras, de acordo com a Figura 11, e Emp_2 a menor distância.

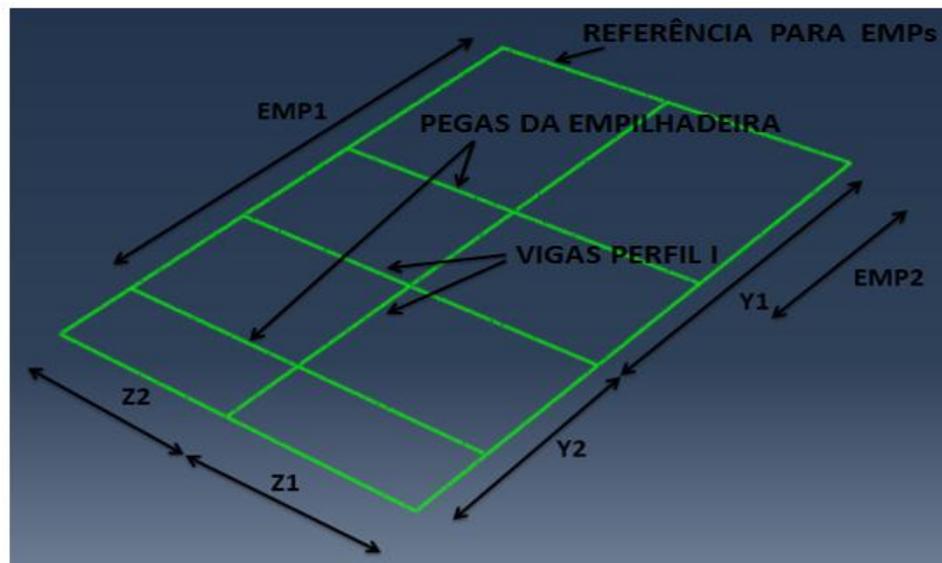


Figura 11 – Nomenclatura das dimensões na parte inferior do *skid*

Fonte: Autoria própria

A Figura 12 ilustra a posição do centro de massa do equipamento em cada um dos eixos de coordenada cartesiana (CGE_x, CGE_y, CGE_z) , em relação ao ponto de fixação, representado em azul. Quando inicia-se o programa, o usuário deve fornecer estes valores. Sendo que eles devem ser positivos caso o CG esteja dentro da distância Y_1 no eixo y ou dentro de Z_1 para o eixo z . Caso o CG esteja dentro de Y_2 , CGE_y deve ser negativo e CGE_z será negativo caso CG esteja dentro da distância Z_2 .

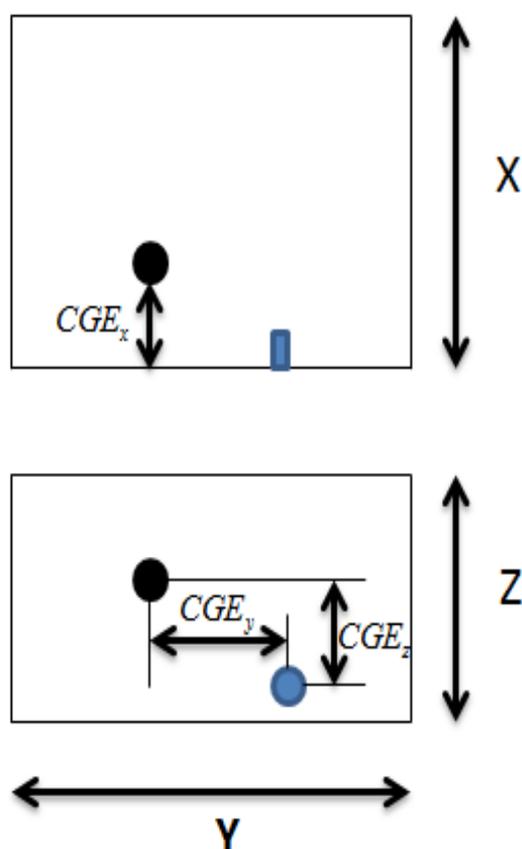


Figura 12 - Posição do CG no equipamento

Fonte: Autoria própria

Além dos dados de centro de massa, quando o usuário inicia o programa é necessário fornecer as dimensões, massa e posição do centro geométrico do equipamento. Para os dados dimensionais, primeiramente deve ser digitado a altura (X), a largura (Z) e o comprimento (Y) do equipamento. Após isto, o usuário deve informar a distância (Y_1) e o comprimento total do equipamento (Y). O mesmo deve ser feito para o eixo z , onde o usuário informará as distâncias Z_1 e Z_2 . A Tabela 3 apresenta quais são os dados de entrada considerados pelo programa.

Tabela 3 – Dados de entrada do programa
(Continua)

$CGE_x [mm]$	Centro de gravidade do equipamento no eixo x
$CGE_y [mm]$	Centro de gravidade do equipamento no eixo y
$CGE_z [mm]$	Centro de gravidade do equipamento no eixo z
$Massa_{equipamento} [kg]$	Massa do equipamento
ν	Coefficiente de Poisson
$X_{eq} [mm]$	Altura do equipamento
$Y_{eq} [mm]$	Maior comprimento do equipamento
$Z_{eq} [mm]$	Menor comprimento do equipamento
$E [GPa]$	Módulo de elasticidade
$\sigma_{esc} [MPa]$	Tensão de escoamento
$Perfil_{viga}$	Perfil da viga
$D_{emp} [mm]$	Distância entre as vigas da empilhadeira
$Y_{eq_1} [mm]$	Maior distância do ponto de fixação no eixo y
$Y_{eq_2} [mm]$	Menor distância do ponto de fixação no eixo y
$Z_{eq_1} [mm]$	Maior distância do ponto de fixação no eixo z
$Z_{eq_2} [mm]$	Menor distância do ponto de fixação no eixo z
FS	Fator de segurança

Tabela 7 – Dados de entrada do programa
(Conclusão)

FAD	Fator de amplificação dinâmica
$GlobalSize[m]$	Tamanho da malha dos elementos finitos
$\theta[^\circ]$	Ângulo das forças aplicadas no olhal em relação a vertical

Fonte: Autoria própria

3.1.2 Cálculos necessários para o modelo no Abaqus®

Para os cálculos geométricos do equipamento é verificado se a estrutura tombará quando submetida à uma inclinação de 30° , de acordo com a norma API17D. Logo, torna-se necessário conhecer a posição do centro de gravidade do *skid* combinado com o do equipamento. Como as seções do *skid* mudam em cada loop que o programa realiza, este cálculo se repete várias vezes.

Para realizar as simulações o programa em C utiliza três diferentes carregamentos mostrados nas Figura 13, Figura 14 e Figura 15. Na Figura 13 é ilustrado um modelo do *skid* sendo içado pelos quatro olhais. Para simular esta situação, consideraram-se as forças aplicadas nos olhais com θ graus em relação a vertical e se encontrado no ponto central dos quatro olhais. Foi inserida a restrição de momento nos quatro olhais, e a força peso resultante foi aplicada sobre o ponto de fixação, bem como os momentos gerados pela descentralização dos equipamentos.

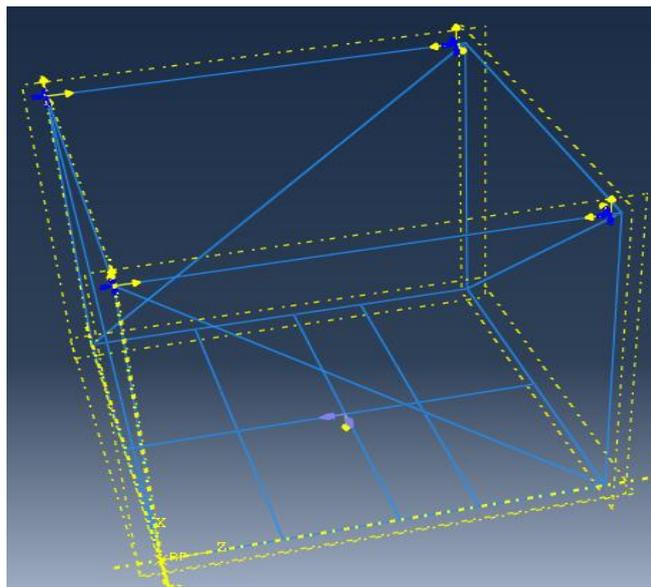


Figura 13 - Carregamento de içamento do *skid*

Fonte: Autoria própria

No carregamento ilustrado na Figura 14 é representado o *skid* sendo levantado por uma empilhadeira, com o *skid* se apoiando nas pás da empilhadeira de maneira uniforme. Para simular esta situação, consideraram-se as pegas para empilhadeira engastadas até o final do comprimento das pás.

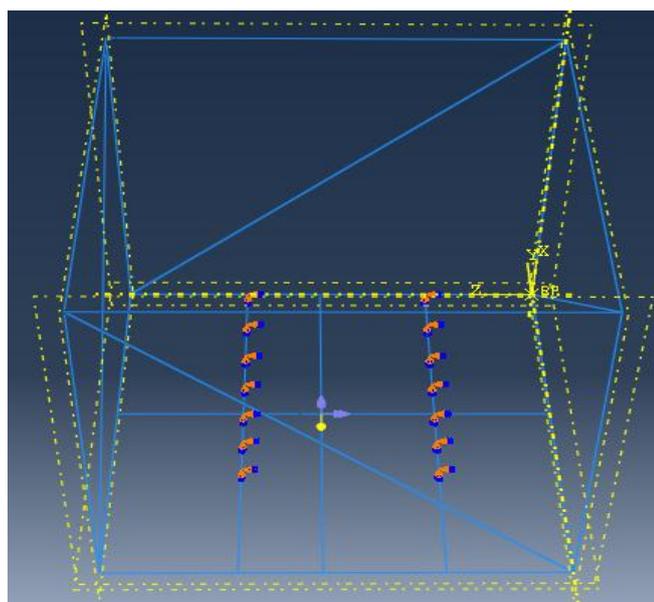


Figura 14 - Carregamento simulando o *skid* sendo levantado pela empilhadeira

Fonte: Autoria própria

A Figura 15 ilustra o mesmo caso da Figura 14, mas considerou-se que o *skid* se apoia em apenas dois pontos das pás da empilhadeira.

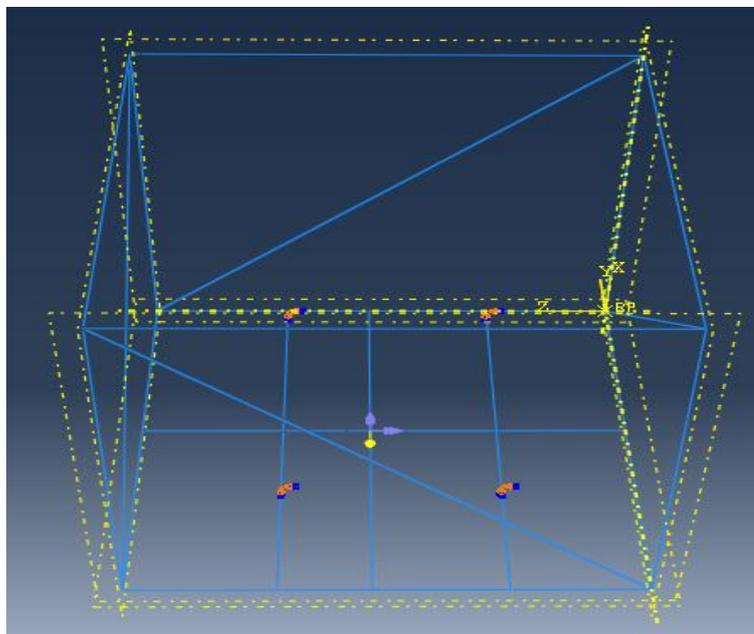


Figura 15 - Carregamento simulando o *skid* sendo levantado pela empilhadeira por dois pontos de apoio

Fonte: Autoria própria

Para a confecção do programa foi necessário utilizar algumas equações que são apresentadas a seguir, começando pelo peso da parte superior do *skid*.

$$\text{Re } s_1 = (X + Z + \sqrt{X^2 + Z^2}) \cdot \text{Pe}_1 \quad (1)$$

$$\text{Re } s_2 = (X + Y + \sqrt{X^2 + Y^2}) \cdot \text{Pe}_1 \quad (2)$$

Onde:

Re_{s_1} : é o peso em cada um dos lados do *skid* localizados no plano xz ;

Re_{s_2} : é o peso em cada um dos lados do plano xy ;

Pe_1 : é o peso da seção superior por m ;

X : é a altura do equipamento;

Y : é o comprimento do equipamento;

Z : é a largura do equipamento;

Para o cálculo do CG combinado do equipamento e do *skid*, são necessárias as Equações (3), (4) e (5):

$$CGE_x = 4 \cdot \frac{X^2}{2} \cdot Pe_1 + 2 \cdot X \cdot Y \cdot Pe_1 + 2 \cdot X \cdot Z \cdot Pe_1 + 2 \cdot \frac{X}{2} \cdot Pe_1 \cdot \sqrt{X^2 + Y^2} + 2 \cdot \frac{X}{2} \cdot Pe_1 \cdot \sqrt{X^2 + Z^2} \quad (3)$$

$$CGE_y = \frac{Y}{2} \cdot (2 \cdot Re_{s_1} + 2 \cdot Re_{s_2} + 2 \cdot Z \cdot Pe + 3 \cdot Y \cdot Pe + 2 \cdot Y \cdot Pe_2) + Z \cdot Pe \cdot Y_1 \quad (4)$$

$$CGE_z = \frac{Z}{2} \cdot (2 \cdot Re_{s_1} + 2 \cdot Re_{s_2} + 3 \cdot Z \cdot Pe + 2 \cdot Y \cdot Pe) + Y \cdot Pe \cdot Z_1 \quad (5)$$

Onde:

Pe : é o peso da seção por metro na base;

Pe_2 : é o peso da seção por metro nas pegas para empilhadeira;

Para o cálculo dos centros de gravidades em cada um dos três eixos, temos as Equações (6), (7) e (8):

$$CG_x = \left(\frac{CGE_x \cdot Pe + CGE_x}{Pe + 2 \cdot Re_{s_1} + 2 \cdot Re_{s_2} + 3 \cdot Y \cdot Pe + 3 \cdot Z \cdot Pe + 2 \cdot Y \cdot Pe_2} \right) \quad (6)$$

$$CG_y = Y_1 \pm \left(\frac{(Y_1 - CGE_y).Pe + CGE_y}{Pe + 3.Y.Pe + 2.Y.Pe_2 + 3.Z.Pe + 2.Re.s_1 + 2.Re.s_2} \right) \quad (7)$$

$$CG_z = Z_1 - \left(\frac{(Z_1 - CGE_z).Pe + CGE_z}{Pe + 3.Z.Pe + 3.Y.Pe + 2.Re.s_1 + 2.Re.s_2} \right) \quad (8)$$

Onde:

CG_x : é o centro de gravidade combinado no eixo x ;

CG_y : é o centro de gravidade combinado no eixo y ;

CG_z : é o centro de gravidade combinado no eixo z ;

CGE_x : é o centro de gravidade do equipamento no eixo x ;

CGE_y : é o centro de gravidade do equipamento no eixo y ;

CGE_z : é o centro de gravidade do equipamento no eixo z ;

Para o cálculo da força aplicada no ponto de fixação do equipamento no *skid* na direção x , utiliza-se a Equação (9):

$$F_x = \left(P + (3.Y.Pe + 2.Y.Pe_2 + 3.Z.Pe + 2.Res_1 + 2.Res_2) \right) . g . FS . FAD \quad (9)$$

Onde:

g : é a aceleração da gravidade;

FS : é o fator de segurança;

FAD : é o fator de amplificação dinâmica;

Para encontrar as forças aplicadas pelos cabos que suspendem o *skid* nas direções y e z considera-se que os cabos estão a um ângulo de 30° em relação à vertical.

$$FH = \frac{\text{sen}(\theta) \cdot F_x}{4} \quad (10)$$

$$d_1 = Z - \text{olhal}_z \quad (11)$$

Onde:

FH : é a força horizontal aplicada no *skid*;

olhal_z : é à distância em z do olhal em relação ao vértice mais próximo;

d_1 : é à distância do olhal ao vértice mais distante;

Para calcular a componente z da força aplicada no olhal, utiliza-se a Equação (12):

$$F_z = \frac{d_1}{\sqrt{d_1^2 + Y^2}} \cdot FH \quad (12)$$

Para a componente y da força aplicada no olhal, utiliza-se a Equação (13):

$$F_y = \frac{Y}{\sqrt{d_1^2 + Y^2}} \cdot FH \quad (13)$$

Devido ao centro de massa do equipamento, muitas vezes, não estar centralizado sobre o ponto de fixação. É importante calcular o momento gerado pelo

equipamento sobre o ponto de fixação, que é onde o equipamento é fixado no *skid*. Dessa forma, o cálculo do momento no eixo y é apresentado na Equação (14).

$$M_y = \pm F_x \cdot CGE_z \quad (14)$$

Para o cálculo do momento no eixo z é apresentado a Equação (15):

$$M_z = \pm F_x \cdot CGE_y \quad (15)$$

Considerando que na maioria das vezes o centro de massa do equipamento não está exatamente no meio do *skid* de transporte, é necessário realizar o cálculo da posição dos olhais, para que estes estejam à distância mais próxima possível do centro do *skid*. Para a realização dos cálculos, considerou-se que o centro geométrico esteja centralizado no eixo y e que só varia no eixo z . É uma recomendação para o usuário do programa posicionar o CG do equipamento sobre o eixo z , ou seja, em $y=0$ considerando a origem no ponto de fixação, para que fique descentralizado apenas em z .

Para a realização dos cálculos considerou-se três casos: o primeiro o CGE_z é positivo (está sobre z_1) e $z_1 - CGE_z > z_2 + CGE_z$, no segundo CGE_z é positivo (está sobre z_1) e $z_1 - CGE_z < z_2 + CGE_z$. O terceiro caso CGE_z é negativo (está sobre z_2).

Como origem da posição do olhal considerou-se o vértice sobre o qual estaria o olhal se sua posição não fosse modificada. Para o primeiro caso, a Equação (16) foi proposta:

$$olhal_1 = z_1 - z_2 - 2 \cdot CG_z \quad (16)$$

Onde:

$Olhal_1$: é à distância da viga de origem dos dois olhais que estão sobre z_1 .

Para o segundo caso, tem-se a Equação (17):

$$Olhal_2 = z_2 - z_1 + 2.CG_z \quad (17)$$

Onde:

$Olhal_2$: é à distância da viga de origem dos dois olhais que estão sobre o eixo z_2 .

No terceiro caso, utiliza-se a Equação (18):

$$Olhal_1 = z_1 - z_2 + 2.CG_z \quad (18)$$

Outro cálculo importante é o da posição das pegas para empilhadeira, sendo considerados dois casos. No primeiro caso da pega da empilhadeira, considera-se que $CG_z > 0$, e utiliza-se as Equações (19) e (20):

$$Emp_1 = z_1 - CG_z - \frac{D_{emp}}{2} \quad (19)$$

$$Emp_2 = z_2 + CG_z - \frac{D_{emp}}{2} \quad (20)$$

No segundo caso considera-se $CG_z < 0$, e utiliza-se as Equações (21) e (22):

$$Emp_1 = z_2 - CG_z - \frac{D_{emp}}{2} \quad (21)$$

$$Emp_2 = z_1 + CG_z - \frac{D_{emp}}{2} \quad (22)$$

Onde:

D_{emp} : é a distância entre as pegas da empilhadeira (que é um dado de entrada).

3.1.3 Informações do *script* transcritas para a linguagem *Python*

As informações dos dados de entrada no Abaqus ® geram resultados que são armazenados e então as informações são acessadas mediante aos *scripts* desenvolvidos em *Python* ou C++.

3.1.4 Simulação no Abaqus ®

O modelo utilizado pelo Abaqus ® no programa para realizar as simulações do MEF é o elemento de viga. Portanto, não é possível adicionar nenhum furo ou corte nas seções. No entanto, o modelo real do *skid* possui dois cortes em cada uma das três vigas em I, que são transversais à viga da pega da empilhadeira, de acordo com a Figura 16. Dessa forma, o modelo utilizado para realizar as simulações pelo MEF não reproduz de forma exata o *skid* de transporte real. Os dados do *skid* são mostrados na Tabela 4. Estes dados de entrada foram escolhidos de forma a não serem muito diferentes do que é comumente utilizado.

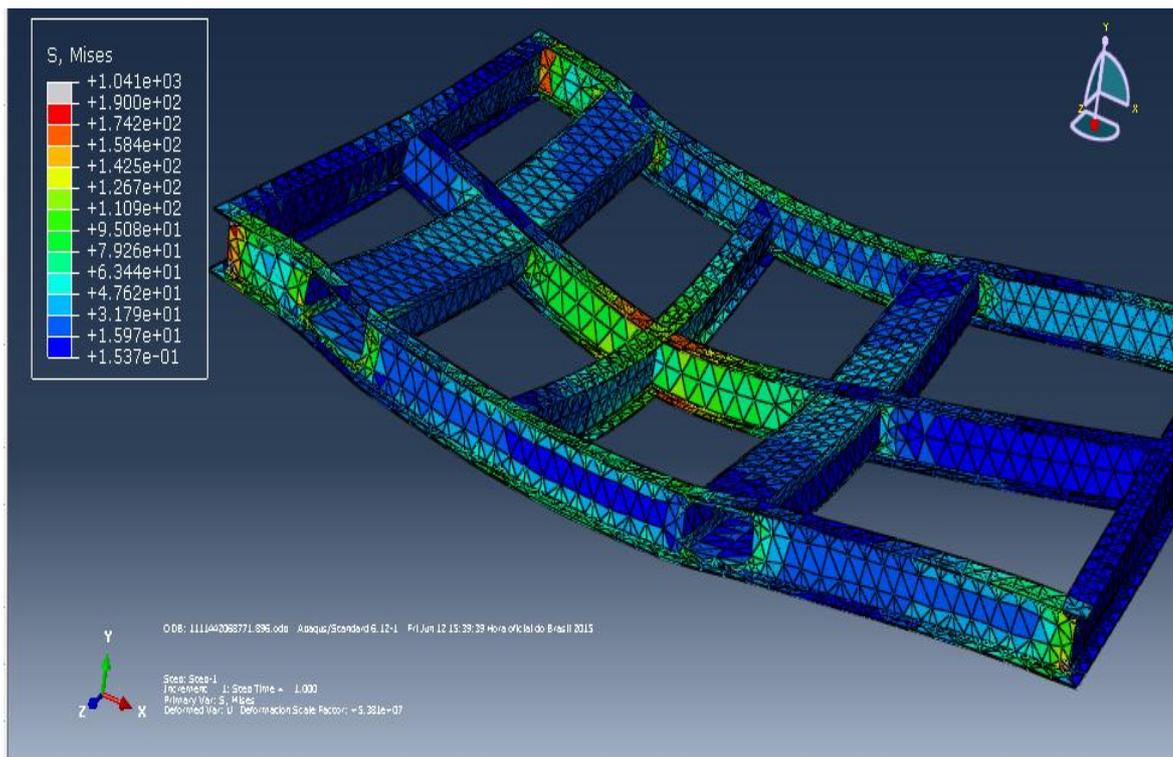


Figura 16 – Base da *skid* com furo na seção da viga I

Fonte: Autoria própria

Tabela 4 – Dados da simulação da base do *skid*

$Massa_{equipamento} [kg]$	9446	$D_{emp} [mm]$	1700
$Poisson$	0,3	$Y_{eq_1} [mm]$	1250
$Y_{eq} [mm]$	2500	$Y_{eq_2} [mm]$	1250
$Z_{eq} [mm]$	3600	$Z_{eq_1} [mm]$	2300
$E [GPa]$	210	$Z_{eq_2} [mm]$	1300

Fonte: Autoria própria

Sendo assim, torna-se necessário a realização de uma simulação em um modelo 3D (elemento sólido) para avaliar a variação causada pela desconsideração destes furos. A Figura 16 ilustra as tensões geradas pela aplicação de uma carga na

interseção das duas vigas em I (chamado ponto de fixação do equipamento) que se interceptam, em um modelo 3D onde as vigas em I são cortadas e estão nas mesmas condições de esforços que foram aplicados para gerar a Figura 17. Mas neste modelo as vigas em I, perpendiculares às vigas de pegas da empilhadeira, não são furadas.

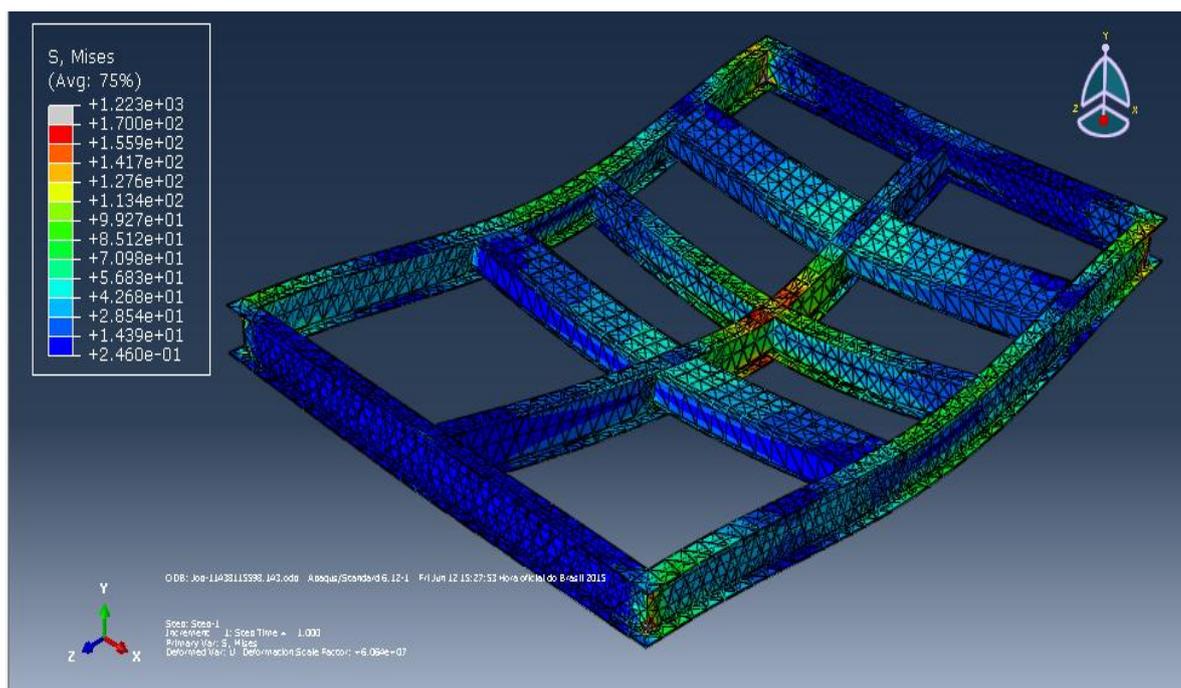


Figura 17 – Base da *skid* sem corte na seção da viga I
Fonte: Autoria própria

Fazendo uma comparação entre a base do *skid* da Figura 16 com o da Figura 17, nota-se que a tensão máxima no ponto crítico da estrutura com furo na seção da viga em I é 10 % maior que na estrutura sem furo na seção da viga em I. Logo, a desconsideração dos furos nas seções das vigas em I interferiu no resultado do MEF.

O ponto crítico do *skid*, mencionado anteriormente, é na região de intersecção das vigas em I que são perpendiculares entre si, cruzando-se entre as duas pegas dos garfos da empilhadeira. A Figura 18 mostra a região do ponto crítico.

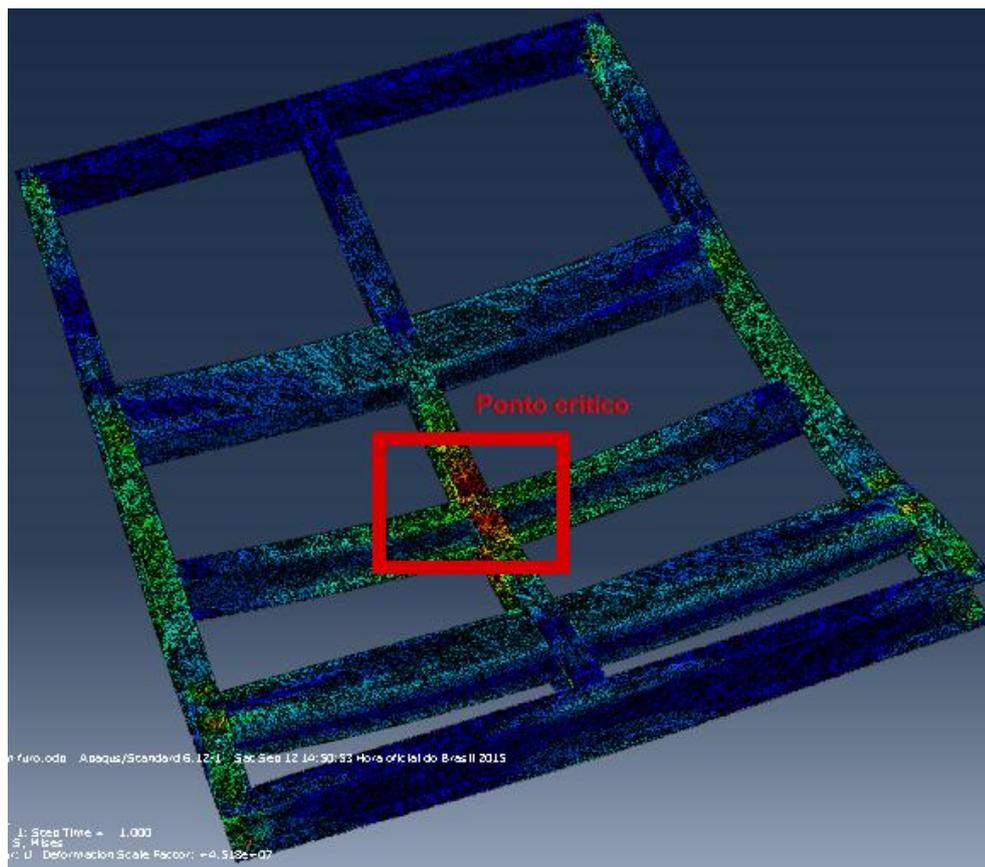


Figura 18 – Ponto crítico da base da *skid*
Fonte: Autoria própria

A Figura 19 ilustra um zoom da Figura 16 mostrando os detalhes do ponto de fixação do equipamento. Como é possível ver na figura, na interseção entre as duas vigas existem pontos em que a tensão ultrapassa a tensão máxima dos outros pontos da viga. O programa desenvolvido em C++ analisa apenas as tensões nas vigas, sendo que os nós (interseção entre vigas) ficarão por conta do projetista que fará o modelo 3D. Dessa forma os pontos em que a tensão ultrapassa os 200 *MPa* não são um problema para a proposta do presente trabalho, sendo que poderão ser resolvidos com um reforço, ou com a fixação do equipamento em mais de um ponto.

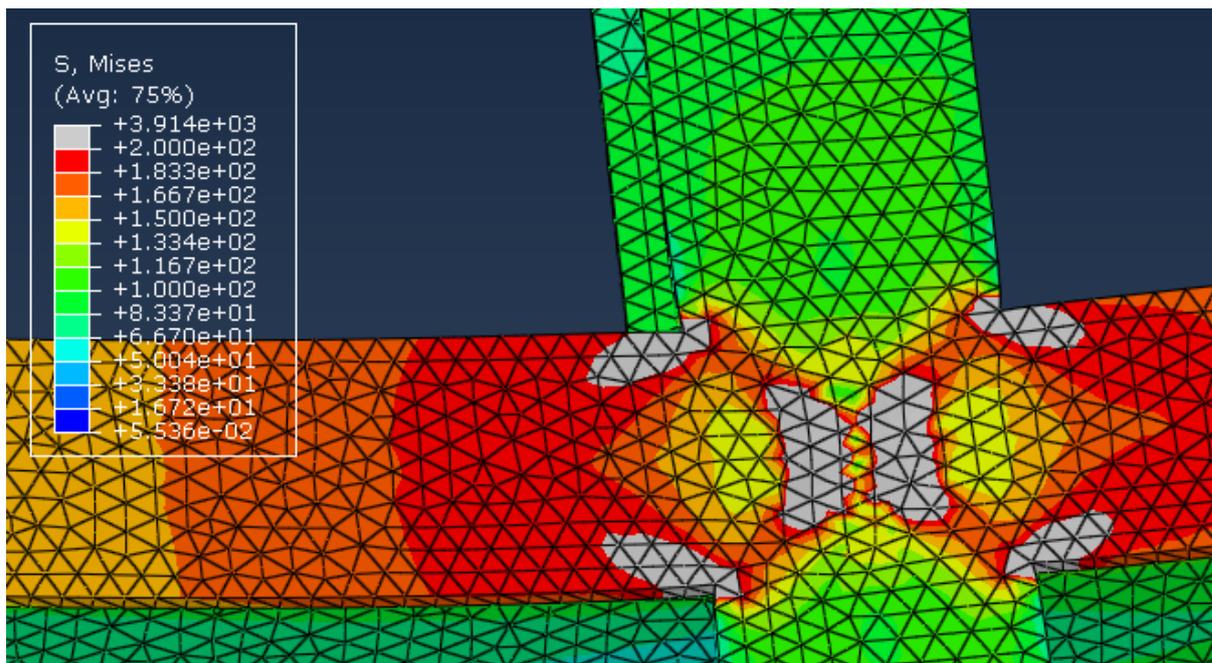


Figura 19 - Zoom da Figura 16 mostrando o ponto de fixação do equipamento
Fonte: Autoria própria

Na análise pelo MEF das estruturas com e sem corte na seção da viga em I, aparecem tensões muito maiores que as do ponto crítico. Ocorre isto pelo fato das bordas do *skid* terem sido consideradas engastadas, o que não condiz com a realidade. No entanto, esta consideração facilita a análise estrutural na base do *skid*, que é a região crítica, portanto, de maior atenção para a análise estrutural.

A Figura 19 ilustra um zoom da Figura 16 em um ponto crítico em que a pega para empilhadeira atravessa a viga em I. Como é possível ver na figura a tensão em pequenas regiões ultrapassa a tensão de 200 *MPa* na interseção da viga em I com a pega para empilhadeira. Como as dimensões das pegas para empilhadeira seguem a norma API17D, os pontos da viga em caixa não precisam ser analisados, sendo que os pontos de interseção das em viga em I devem ser analisados pelo projetista, levando em conta se a deformação é suficiente para fraturar o *skid*.

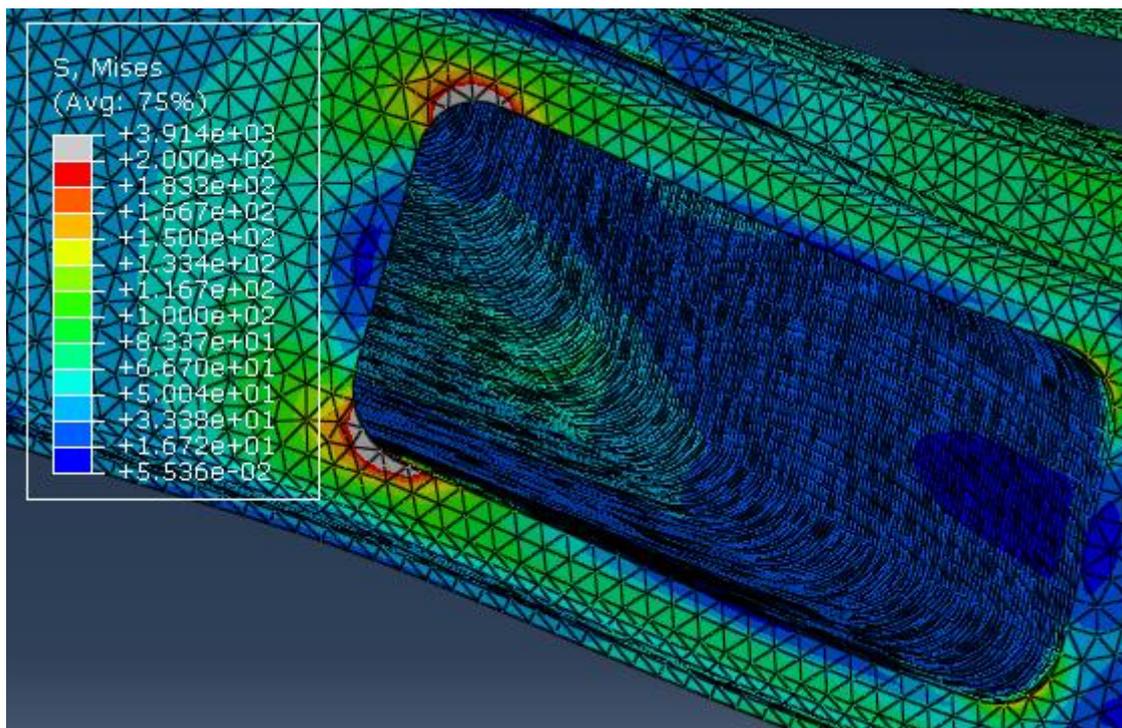


Figura 20 - Zoom da Figura 16 em um dos cortes da viga em I

Fonte: Autoria própria

A Figura 21 apresenta análise estrutural da base do *skid* utilizando elemento de viga. Fazendo uma comparação entre o elemento de viga com um elemento sólido com furo na seção da viga em I (Figura 16), ocorre uma diferença na tensão máxima no ponto crítico muito pequena, apresentando uma tensão máxima muito mais próxima da base furada do que da base sem furo. Portanto, uma análise utilizando uma estrutura com elemento de viga ou elemento sólido (3D) teve uma diferença no resultado muito pequena para o caso testado, diferença esta que pode ser absorvida pelo coeficiente de segurança, se o resultado for o mesmo para mais casos testados.

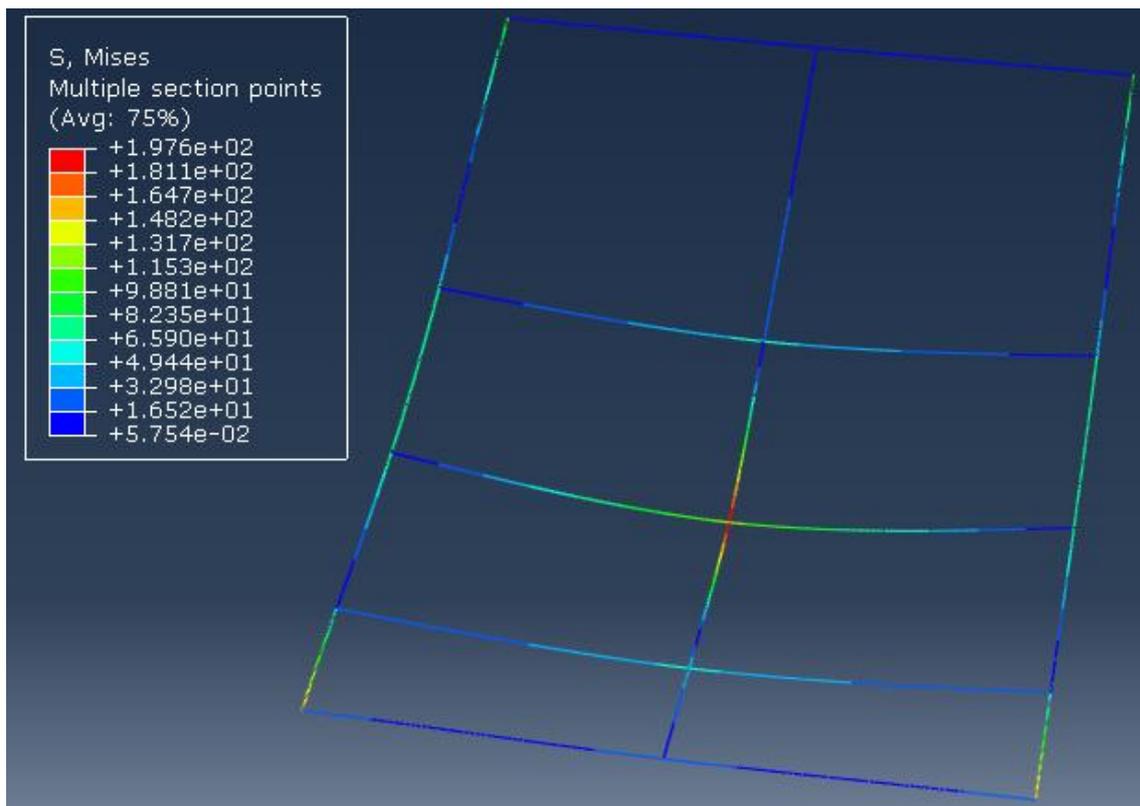


Figura 21 – Base da *skid* em elementos de viga

Fonte: Autoria própria

3.1.5 Análise dos resultados

A análise dos resultados é feita comparando a tensão de escoamento do material escolhido com a tensão de Von Misses encontrada em todos os pontos da malha. Esta comparação é feita de forma separada para a parte superior e para a base do *skid*. Se a tensão de Von Misses for maior que a do material em uma das partes do *skid*, esta parte é reprovada e os cálculos necessários para o modelo no Abaqus® são refeitos. No entanto, se as tensões de Von Misses não ultrapassarem a tensão de escoamento do material o programa analisa se o perfil imediatamente menos resistente foi testado, caso positivo a parte do *skid* analisada é definida, caso negativo os cálculos são feitos com outra seção.

3.2 Justificativa da Metodologia

O Abaqus ® é um *software* que utiliza o MEF para realizar seus cálculos estruturais e é muito utilizado na indústria e por pesquisadores. É um *software* CAE consagrado no cálculo estrutural, realizando simulações de geometrias simples, como é o caso dos *skids* de transporte, ou até mesmo de geometrias complexas. Além também, deste *software* ser utilizado na empresa apresentada neste trabalho. Portanto, é perfeitamente razoável a escolha para o uso deste *software* no presente trabalho.

Neste trabalho é utilizado elemento de viga, para deixar mais rápido o processo de automatização. Pois utilizando elementos sólidos o desenho da estrutura é gerado em 3D e neste processo o computador é mais exigido, fazendo com que se leve mais tempo para executá-lo. Já com elementos de vigas, são geradas somente as propriedades mecânicas e geométricas da estrutura. Deixando o processo de automatização mais dinâmico, o que é muito importante para redução de custo e tempo no projeto.

Quanto às linguagens de programação utilizadas, o *Python* foi usado nos *scripts* por ser a linguagem interna do Abaqus ® e o C++ foi escolhido para programar por ser a linguagem de domínio dos programadores, autores do presente trabalho.

3.3 Produtos do Projeto

O produto do presente trabalho é um programa escrito em C, que faz a leitura de dados de entrada inseridos pelo usuário, e então, o *software* CAE Abaqus ® recebe as informações desses dados de entrada e faz a análise estrutural por meio do MEF. Nesta análise o *software* Abaqus ® calcula os esforços estruturais e o programa em C analisa os resultados, repetindo o mesmo processo até chegar a uma estrutura otimizada.

Para realizar este processo utilizou-se o *software* DEV C++, para escrever o programa em C. Após o programa realizar os cálculos preliminares, um *script* com terminação “.py” é gerado pelo programa em C que abre um executável “.bat”. Este executável dá o comando para que o Abaqus ® execute o *script* criado. Após isto o programa espera que um arquivo “.odb” seja criado para monitorar quando a simulação terminou. Ao verificar a criação do arquivo “.odb” o programa fecha o Abaqus ® abrindo um executável “.bat”, e o abre novamente, mas desta vez por meio de um outro executável “.bat”, que executa outro *script* que grava as tensões de Von Mises em todos os pontos, em um arquivo “.rpt”.

Após a gravação deste arquivo o Abaqus ® é fechado novamente e os dados do arquivo, que são as tensões de Von Mises em todos os pontos da malha, são gravados em uma matriz. Após isto, é analisado se todos os pontos da estrutura estão abaixo da tensão de escoamento, sendo que isto é feito de uma maneira separada para a parte superior e a parte inferior do *skid*. O mesmo processo se repete para simular os três carregamentos considerados. Se pelo menos uma das partes da estrutura (parte superior, ou base do *skid*) ficar com a tensão acima da tensão de escoamento em qualquer um dos testes dos três carregamentos, os cálculos preliminares são refeitos e uma nova seção de viga é escolhida para a parte não aprovada.

Os perfis cadastrados no programa são os do ANEXO A e a escolha é feita da seguinte forma: primeiramente é analisado o primeiro perfil, que é o que tem menor resistência, e se ele for aprovado o programa se encerra e este perfil é selecionado. Caso contrário, testa-se o último perfil (o de maior resistência), e se não for aprovado o programa se encerra, pois nenhum perfil cadastrado suporta o esforço. Se for aprovado, um perfil com resistência intermediária é escolhido, e se suportar o carregamento um perfil entre ele e o primeiro é escolhido, senão um perfil entre ele e o último é escolhido. O processo se repete até que um perfil seja aprovado e que o imediatamente menos resistente que ele não suporte o carregamento, chegando assim no perfil ótimo.

No final um arquivo de texto é gerado com as dimensões do *skid* resultante, para que o desenho possa ser feito no *software* de preferência do projetista.

4 RESULTADOS

Para testar o funcionamento do programa em C foram realizadas quatro simulações, onde foram inseridos dados de entrada e o programa deu como resultado um skid e seus respectivos esforços para cada uma destas simulações. Para facilitar o entendimento, estas simulações foram chamadas de casos 1, 2, 3 e 4.

Utilizando os resultados destes casos (o *skid* e seus esforços) realizaram-se simulações manualmente no Abaqus® (sem o uso do programa em C) para testar malhas e avaliar se o resultado do programa em C foi coerente.

4.1 Testes de Malhas referentes ao caso 1

Para testar o funcionamento do programa escrito em C, realizou-se uma simulação para avaliar a resposta encontrada. A Tabela 5 apresenta os dados de entrada utilizados para esta simulação, que mostram que o material escolhido tem módulo de elasticidade (E) de 210 GPa , coeficiente de Poisson (ν) de 0.3 e tensão de escoamento (σ_{esc}) igual a 600 MPa . Considerou-se que o CG do equipamento não se encontra exatamente sobre o ponto de fixação e a posição do CG_{eq_x} , CG_{eq_y} , CG_{eq_z} é mostrada na Tabela 5, mas nesta simulação não foi considerado o momento gerado pelo desbalanceamento do equipamento.

Tabela 5 - Dados de entrada do caso 1
(Continua)

$CG_{eq_x} [mm]$	500	$\sigma_{esc} [MPa]$	600
$CG_{eq_y} [mm]$	200	$Perfil_{viga}$	Tipo I
$CG_{eq_z} [mm]$	200	$D_{emp} [mm]$	1800

Tabela 5 - Dados de entrada do caso 1

(Conclusão)

$Massa_{equipamento} [kg]$	35000	$Y_{eq_1} [mm]$	1800
ν	0,3	$Y_{eq_2} [mm]$	1600
$X_{eq} [mm]$	3000	$Z_{eq_1} [mm]$	1800
$Y_{eq} [mm]$	3400	$Z_{eq_2} [mm]$	1600
$Z_{eq} [mm]$	3400	FS	1
$E [GPa]$	210	$\theta [^\circ]$	30

Fonte: Autoria própria

Os fatores de segurança e amplificação dinâmica foram considerados iguais a 1 neste teste, por se tratar de uma verificação do funcionamento do programa.

Como resultado da simulação chegou-se na Tabela 6, sendo importante ressaltar que o maior esforço foi encontrado na parte inferior do *skid*, onde utilizou-se nesta região a 6ª seção da ANEXO A. Para a parte superior foi utilizada apenas a 2ª seção que aguenta um esforço significativamente menor.

Tabela 6 - Resultado do caso 1

(Continua)

$X [mm]$	3600	$F_y [N]$	31198
$Y [mm]$	4080	$F_z [N]$	32409
$Z [mm]$	4080	$Viga_{sup}$	2°
$Y_1 [mm]$	2160	$Viga_{inf}$	9°

Tabela 5 - Dados de entrada do caso 1

(Conclusão)

$Y_2 [mm]$	1920	$M_y [N.m]$	0
$Z_1 [mm]$	2160	$M_z [N.m]$	0
$Z_2 [mm]$	1920	$Emp_1 [mm]$	2864
$D_{olhal} [mm]$	152	$Emp_2 [mm]$	1064
$F_x [N]$	89966	$Tempo [min]$	28

Fonte: Autoria própria

Sendo *Tempo*, o tempo de simulação que o programa em C levou para gerar os resultados. Este tempo é muito pequeno, levando em conta que atualmente na empresa se demora uma semana para fazer o projeto completo do *skid*.

Como resultado da simulação um *skid* foi calculado pelo programa em C, assim como os esforços aplicados sobre ele. Utilizando este *skid* e seus respectivos esforços, foram realizadas simulações manualmente no Abaqus ® (sem o uso do programa em C), a fim de testar o resultado do programa. Os primeiros testes foram realizados para conhecer a influência das malhas no modelo utilizado.

Para testar a influência das malhas no modelo utilizado, foram realizadas simulações no Abaqus ® com o *skid* e os dados da simulação 1, utilizando diferentes malhas. Dessa forma, a Figura 22 e Figura 23 são apresentadas as tensões referentes ao caso 1 utilizando elementos de vigas e diferentes malhas. Onde nota-se que os resultados variaram significativamente com o refino da malha.

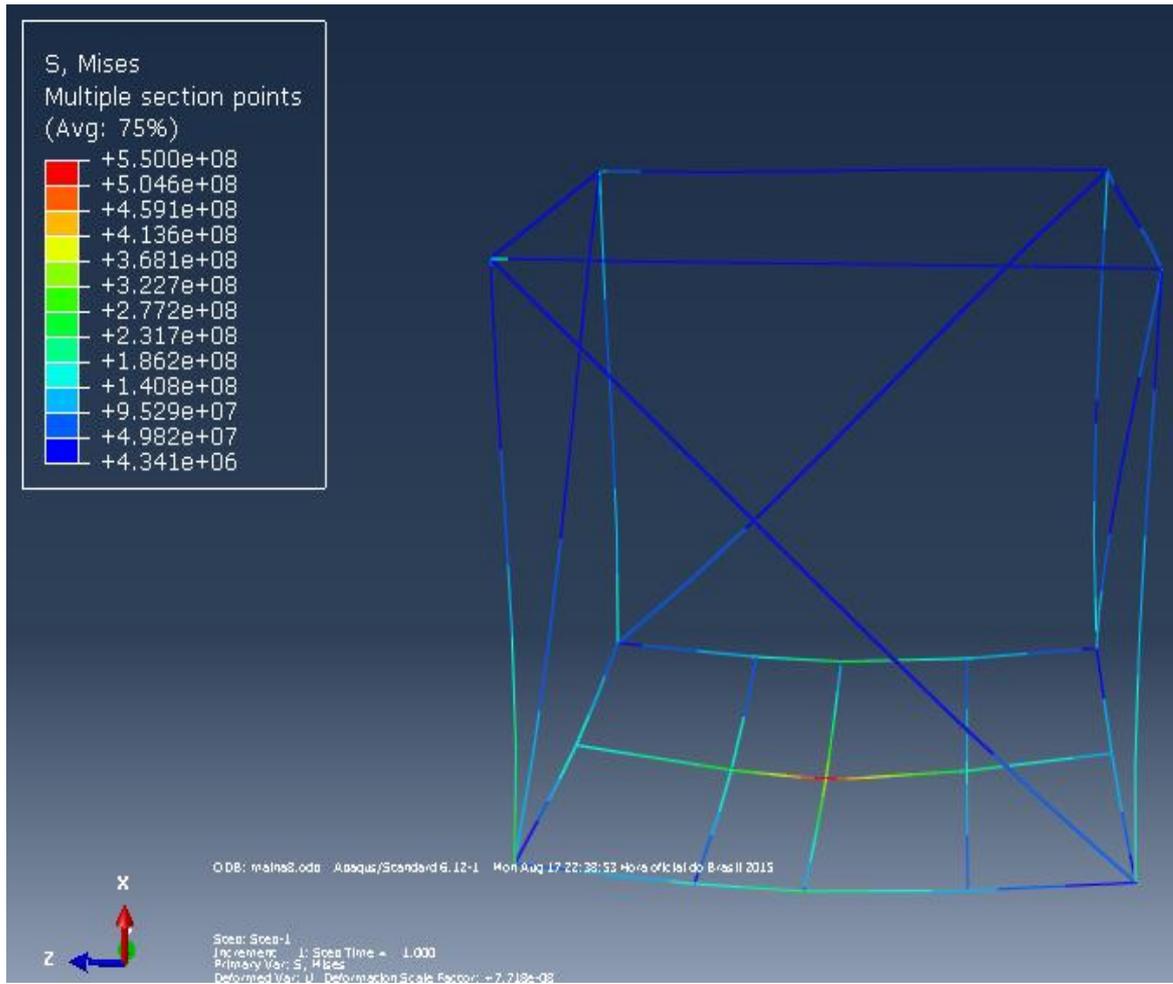


Figura 22 - Tensões caso 1 utilizando elementos de vigas e *global size* de 0.8m

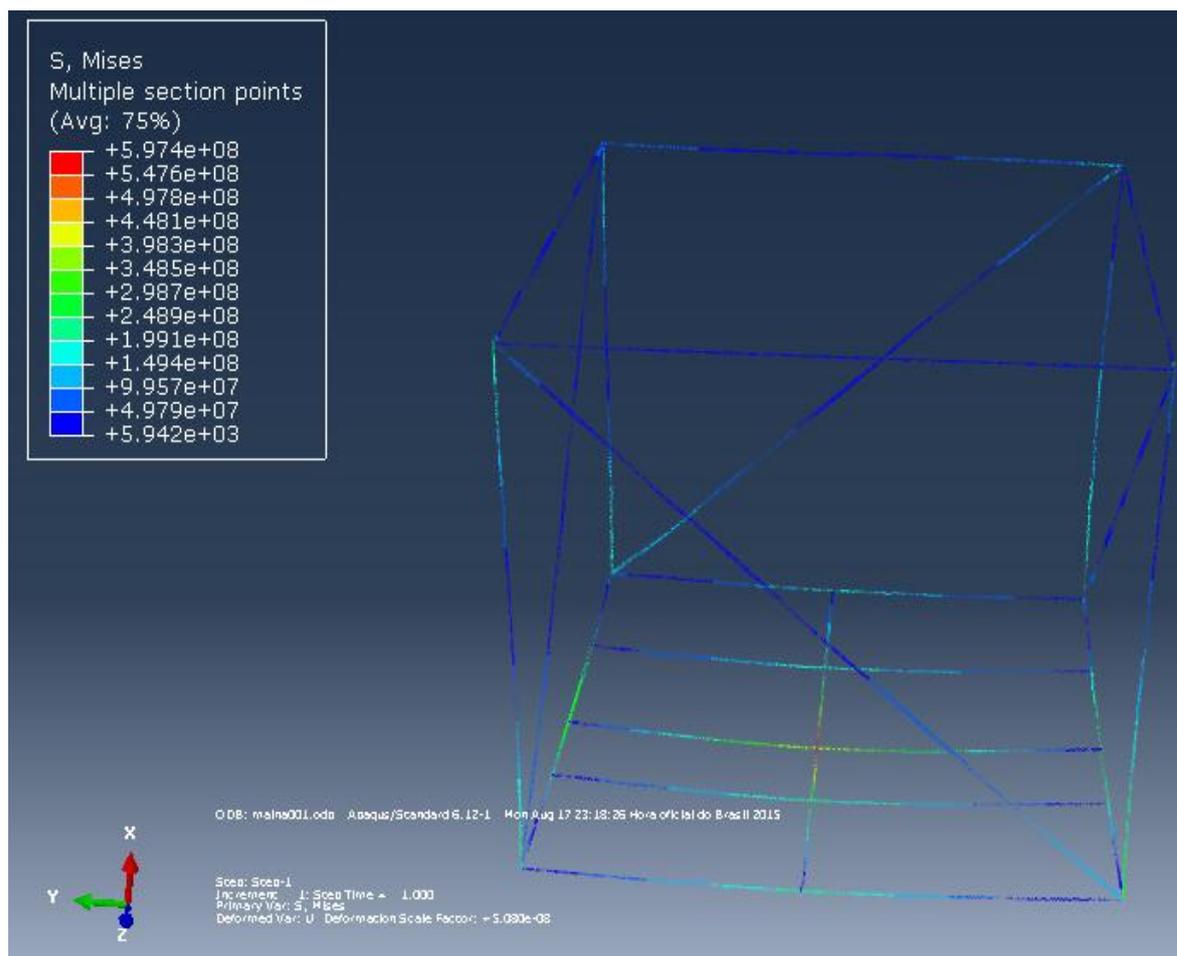


Figura 23 - Tensões caso 1 utilizando elementos de vigas e *global size* de 0.001m

Fonte: Autoria própria

O Gráfico 1 ilustra de forma simplificada os resultados referentes ao caso 1 utilizando elementos de vigas e diferentes malhas. Onde nota-se que com *global size* até 0,2 m o resultado pouco variou, sendo que isto se explica pelo fato dos nós da malha não estarem posicionados sobre locais onde a tensão é crítica. Com o refino da malha atingiu-se gradualmente os pontos de maior tensão, sendo que quando o valor do *global size* atingiu 0,01 m chegou-se a um valor muito próximo do valor ideal, pois quando foi utilizada uma malha dez vezes mais refinada houve uma variação de apenas 0,49 %. Dessa forma, para o programa proposto no presente trabalho sugere-se uma malha com *global size* de 0,01 m de forma a não deixar a análise muito lenta, sendo que o *global size* da malha é uma opção de entrada.

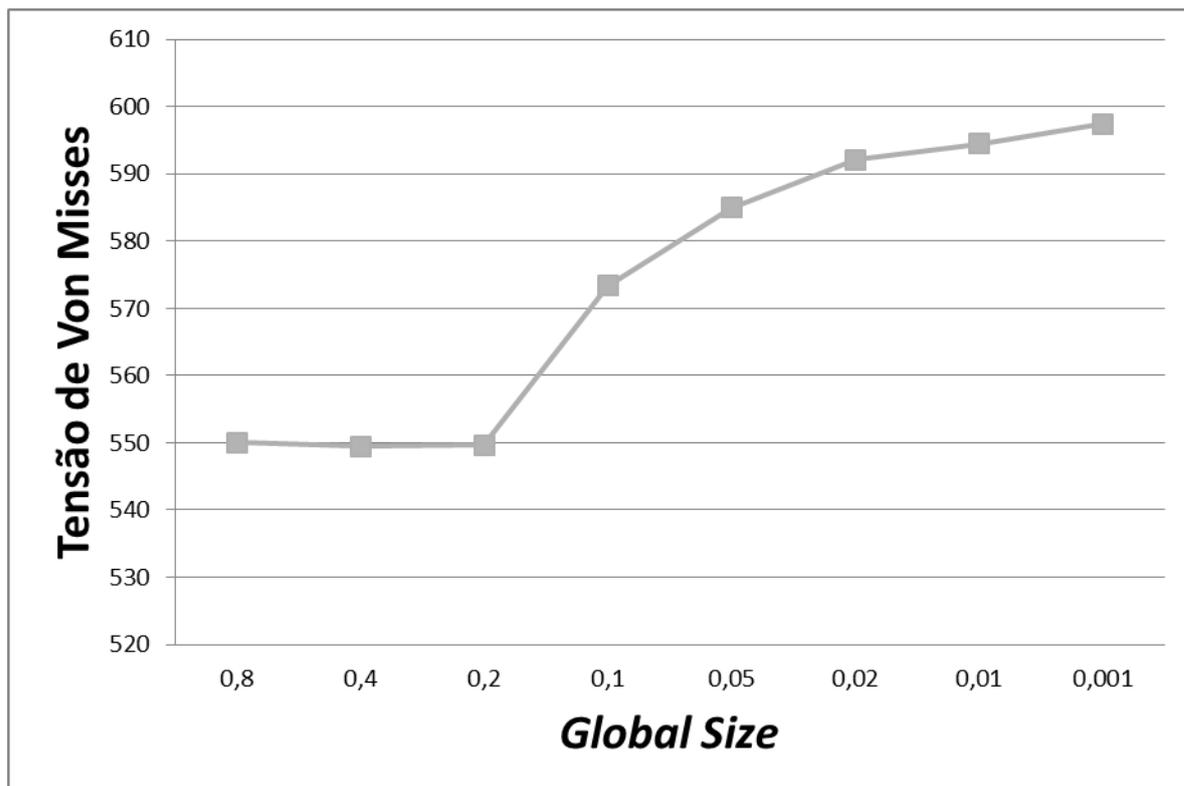


Gráfico 1 – Influência do refino da malha na Tensão de Von Mises para o caso 1

Fonte: Autoria própria

4.2 Testes de Malha Referentes ao Caso 2

As Tabela 7 apresenta os dados de entrada utilizados no caso 2. Assim como no caso 1 considerou-se o coeficiente de segurança e de amplificação dinâmica como 1, pois o objetivo é observar o comportamento do programa.

Os dados de entrada do caso 2 são mais críticos que os do caso 1, sendo que considerou-se um equipamento com peso maior e com maiores dimensões.

Tabela 7 - Dados de entrada do caso 2

$CG_{eq_x} [mm]$	500	$\sigma_{esc_inf} [MPa]$	500
$CG_{eq_y} [mm]$	200	$\sigma_{esc_sup} [MPa]$	570
$CG_{eq_z} [mm]$	200	$Perfil_{viga}$	Tipo I
$Massa_{equipamento} [kg]$	40000	$D_{emp} [mm]$	1700
ν	0,3	$Y_{eq_1} [mm]$	2000
$X_{eq} [mm]$	3000	$Y_{eq_2} [mm]$	1700
$Y_{eq} [mm]$	3700	$Z_{eq_1} [mm]$	2200
$Z_{eq} [mm]$	4200	$Z_{eq_2} [mm]$	2000
$E [GPa]$	210	FS	1
$\theta [^\circ]$	30	FAD	1
$GlobalSize [m]$	0,01		

Fonte: Autoria própria

Já a Tabela 8 apresenta os resultados do caso 2, sendo que estes estão coerentes com o que era esperado, pois as vigas selecionadas pelo programa suportam maiores carregamentos que as selecionadas no caso 1. À distância para o

olhal da tabela Tabela 8 se refere aos olhais que estão sobre z_1 , e é medida em relação à viga y mais próxima.

Tabela 8 - Resultados do caso 2

$X [mm]$	3600	$F_x [N]$	103250
$Y [mm]$	4440	$F_y [N]$	34708
$Z [mm]$	5040	$F_z [N]$	38214
$Y_1 [mm]$	2400	$Viga_{sup}$	4°
$Y_2 [mm]$	2040	$Viga_{inf}$	14°
$Z_1 [mm]$	2640	$M_y [N.m]$	82600
$Z_2 [mm]$	2400	$M_z [N.m]$	82600
$Olhal [mm]$	151	$Tempo [min]$	28
$Emp_1 [mm]$	3294	$Emp_2 [mm]$	1594

Fonte: Autoria própria

As Figura 24 e Figura 25 ilustram as tensões referentes ao caso 2 utilizando elementos de vigas e diferentes malhas. O Gráfico 2 ilustra o resultado obtido com a malha utilizada pelo programa e mostra que ele calculou o *skid* de forma a suportar o carregamento mais crítico, que é o içamento pelos olhais. Como é possível ver na figura, o ponto crítico está localizado em um dos olhais e não no ponto de fixação do equipamento. O principal motivo para que isto aconteça é a maior tensão de escoamento escolhida para a parte superior do *skid*. É importante ressaltar que o olhal crítico é um dos quais não está sobre algum vértice do *skid*, sendo que isto é coerente com o que se esperava, pois os olhais que estão sobre os vértices se apoiam no ponto de encontro de três vigas.

Em relação às malhas é possível ver nas figuras que até um *global size* de $0,1\text{ m}$ o ponto crítico se localiza no ponto de fixação do equipamento, na parte inferior do *skid*. A partir daí, quanto mais se refinou a malha mais evidente ficou que a tensão máxima está em um dos olhais, sendo que a diferença entre as tensões máximas da malha mais refinada e da menos refinada foi maior que 150 MPa .

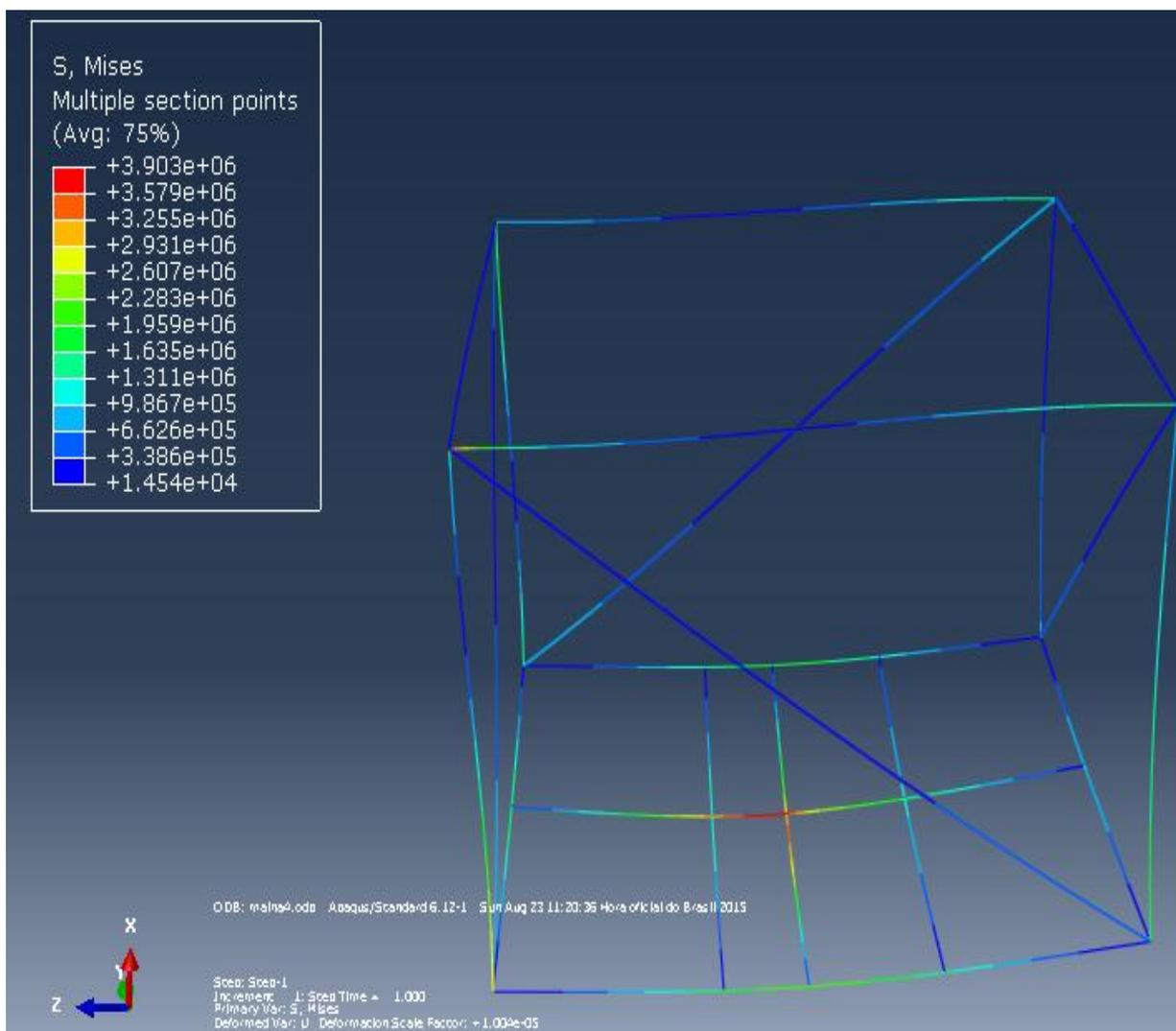


Figura 24 - Tensões caso 2 utilizando elementos de vigas e *global size* de 0.4 m

Fonte: Autoria própria

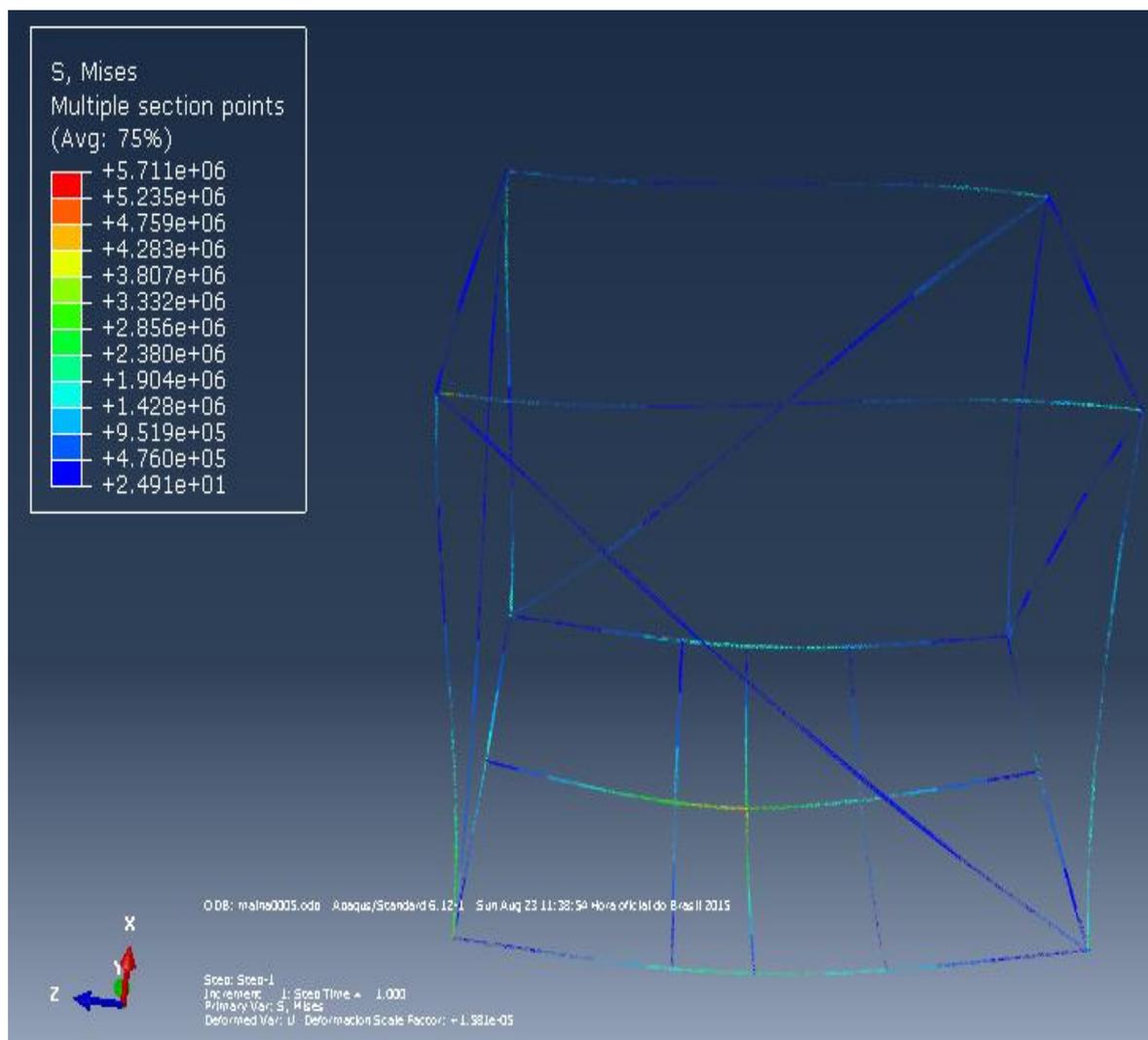


Figura 25 - Tensões caso 2 utilizando elementos de vigas e *global size* de 0.0005 m

Fonte: Autoria própria

O Gráfico 2 apresenta a tensão máxima de Von Mises para cada malha utilizada. Onde é possível ver que até o *global size* de 0,05 m o erro é maior que 20% , sendo que o erro cai gradativamente com o refino da malha como já era esperado.

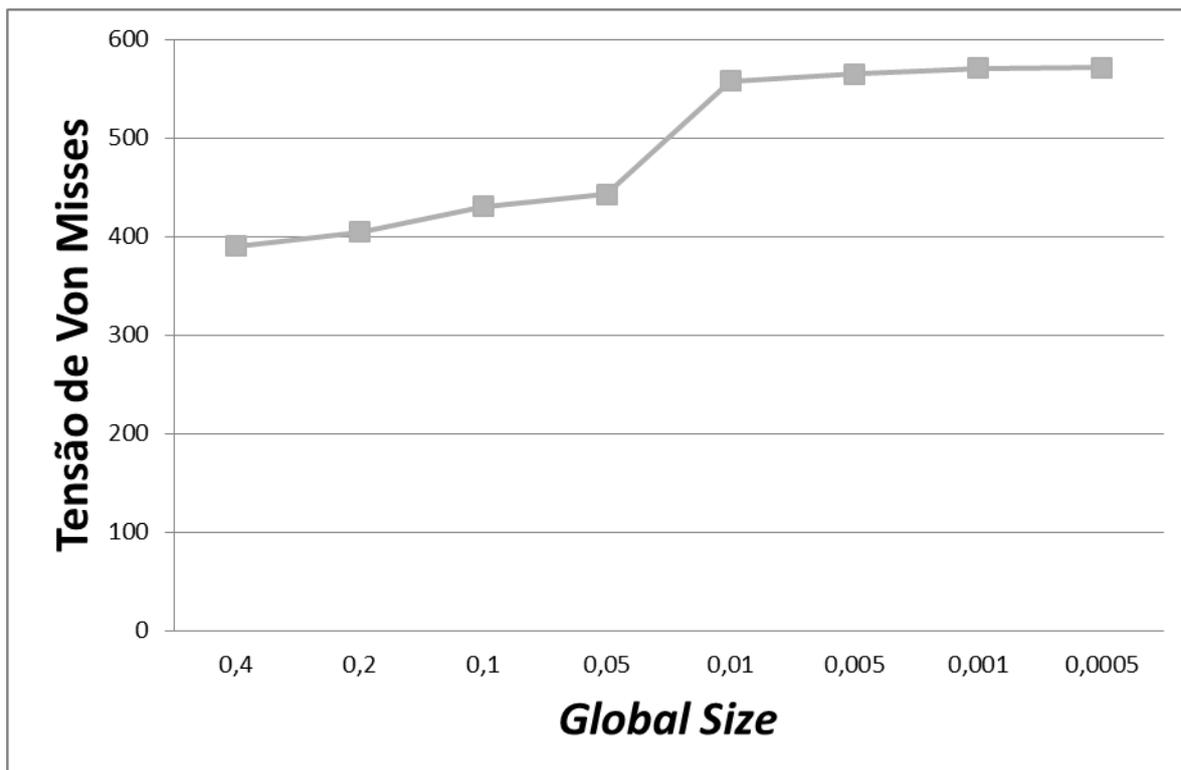


Gráfico 2 - Influência do refino da malha na Tensão de Von Mises para o caso 2

Fonte: Autoria própria

Analisando os testes de malha referentes às simulações 1 e 2 concluiu-se que a malha mais indicada para utilizar é a de $0,01\ m$. Devido ao tempo de simulação mais baixo e ao erro aceitável que foi encontrado. O erro é absorvido pelo coeficiente de segurança utilizado. No entanto, houve problema para fazer as simulações com uma malha de $0,01\ m$. Mas não houve problema para usar uma malha de $0,02\ m$, logo utilizou-se está.

4.3 Simulações Utilizando o Resultado do caso 1

Para verificar se os resultados encontrados pelo programa foram corretos realizou-se simulações no Abaqus® utilizando primeiramente elementos de vigas e posteriormente um modelo 3D. Com estas simulações, pode-se também observar a diferença entre os resultados encontrados utilizando elementos de viga, ou um

modelo 3D. Para facilitar a simulação destes casos utilizou-se uma malha com 0,25 *m* de *global size* tanto nos casos com elementos de vigas como os 3D.

A Figura 26 ilustra os carregamentos para elementos de viga avaliando a parte inferior do *skid* os dados do caso 0 1 e a Figura 27 para o modelo em 3D. Para primeira análise foi considerada a parte superior do *skid* engastada, de forma a permitir que apenas a parte inferior do *skid* seja analisada neste primeiro momento. A força peso do equipamento foi aplicada no ponto de fixação do equipamento.

As malhas utilizadas em todos os modelos 3D e nos modelos com elementos de vigas comparados a algum modelo 3D utilizaram um *global size* de 0,022 *m*, para se ter um menor tempo de simulação.

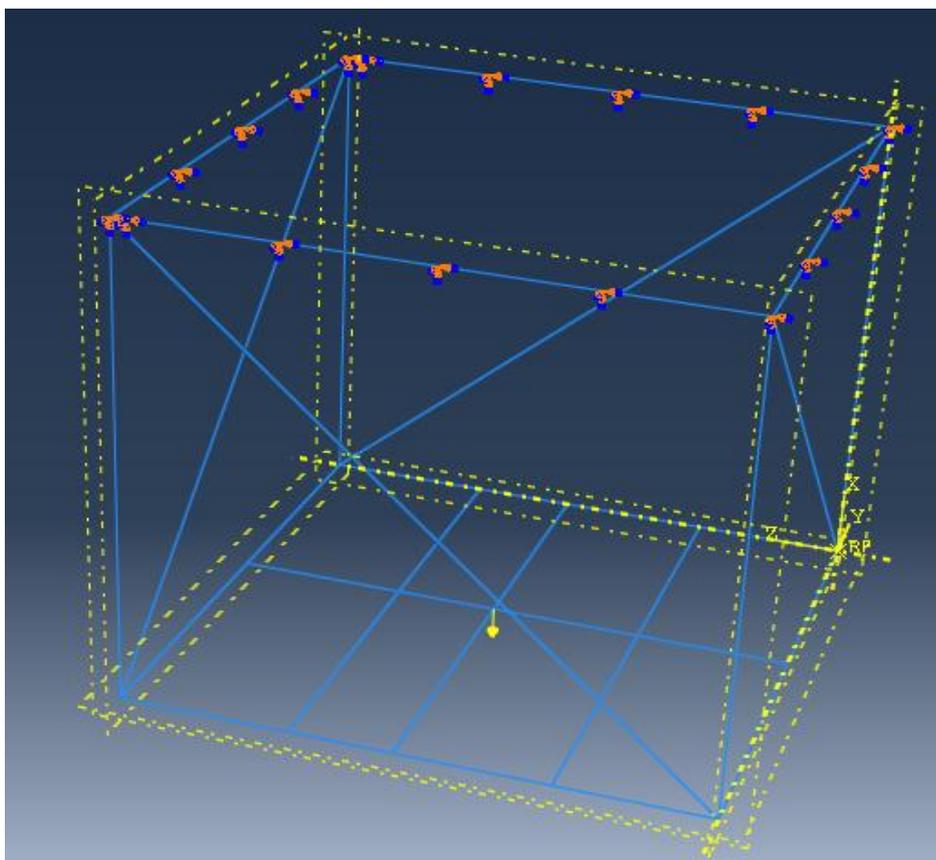


Figura 26 - Carregamento para elementos de viga avaliando a parte inferior do *skid* utilizando os dados do caso 1

Fonte: Autoria própria

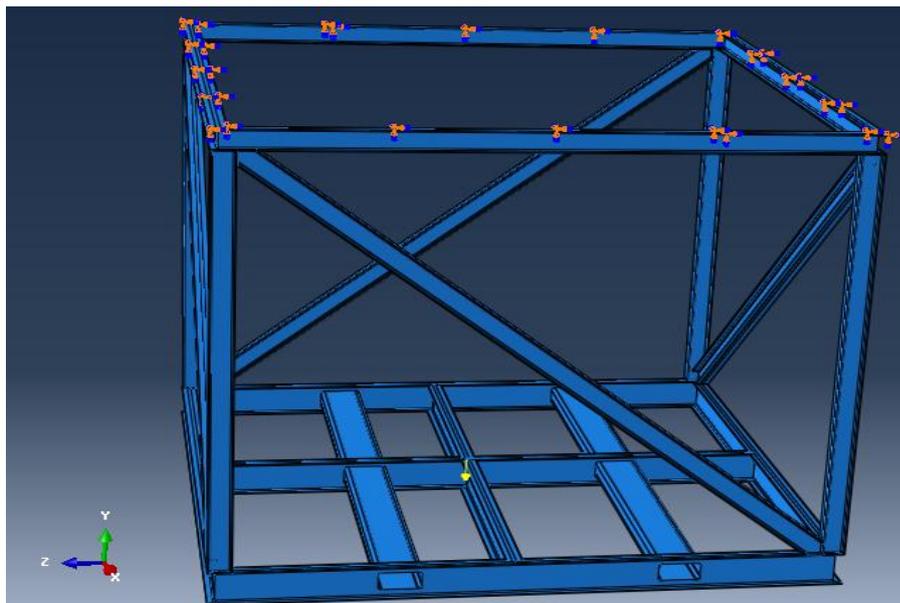


Figura 27 - Carregamento para modelo 3D avaliando a parte inferior do *skid* utilizando os dados do caso 1

Fonte: Autoria própria

As Figura 28, Figura 29 e Figura 30 ilustram os resultados de simulações referentes à caso 1, sendo que na simulação da Figura 28 foram utilizados elementos de viga. Na simulação das Figura 30 e Figura 31 foi utilizado um modelo em 3D. Como é possível ver nas três figuras, os valores da tensão máxima ficou um pouco maior para o caso utilizando elementos de vigas em comparação com o 3D, o que se explica, pela diferença dos dois modelos.

Também é importante observar, que a tensão encontrada ficou abaixo da tensão de escoamento do material. Portanto, a seção da viga escolhida pelo programa estudado realmente suporta o esforço ao qual o *skid* foi submetido.

Para todas as análises estruturais feitas com elementos em 3D do *skid* completo a tensão máxima ultrapassou a tensão de escoamento em alguns nós. Mas como já foi dito, o objetivo do presente trabalho é criar um programa que escolha os perfis e dimensões do *skid*, sendo que uma análise dos nós deverá ser feita posteriormente pelo projetista.

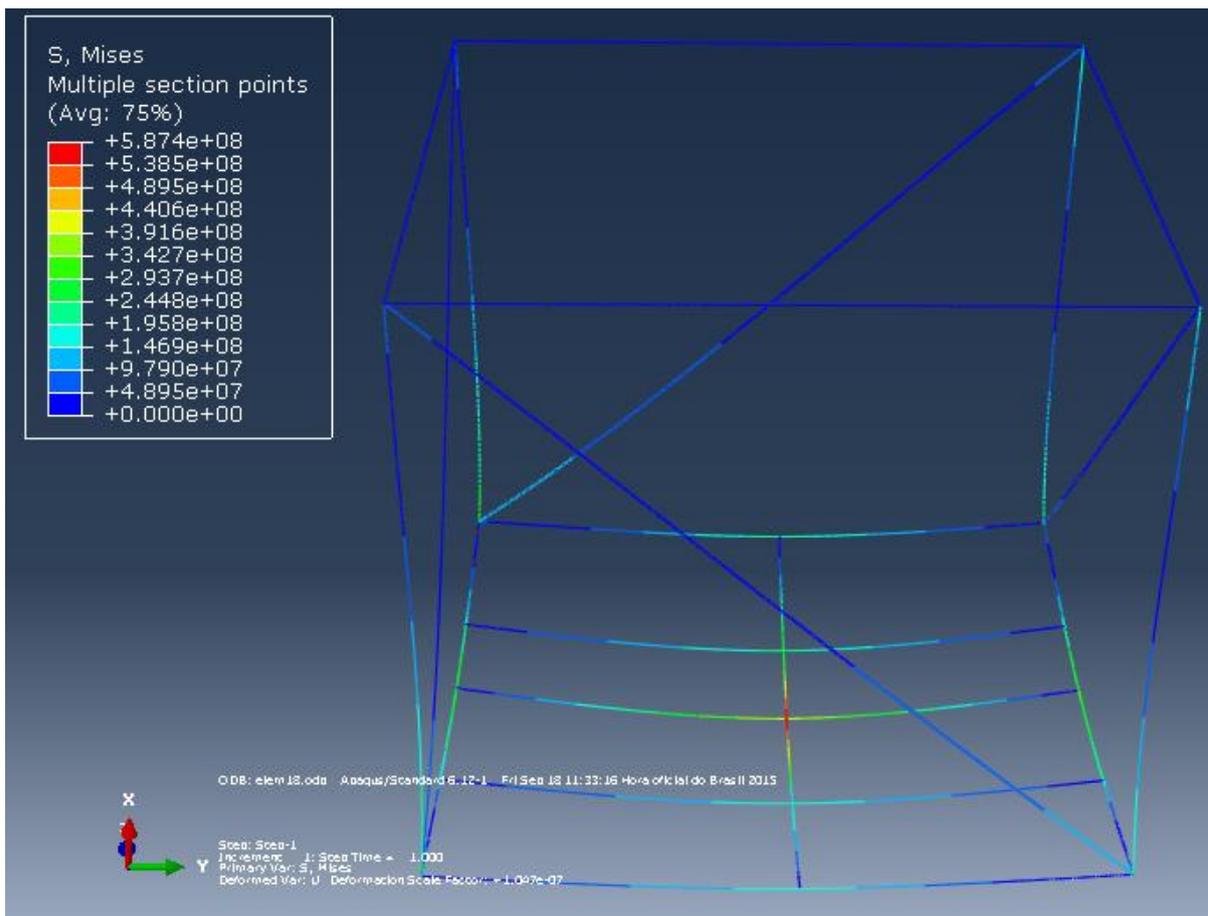


Figura 28 - Tensões na parte inferior utilizando elementos de vigas com dados do caso 1

Fonte: Autoria própria

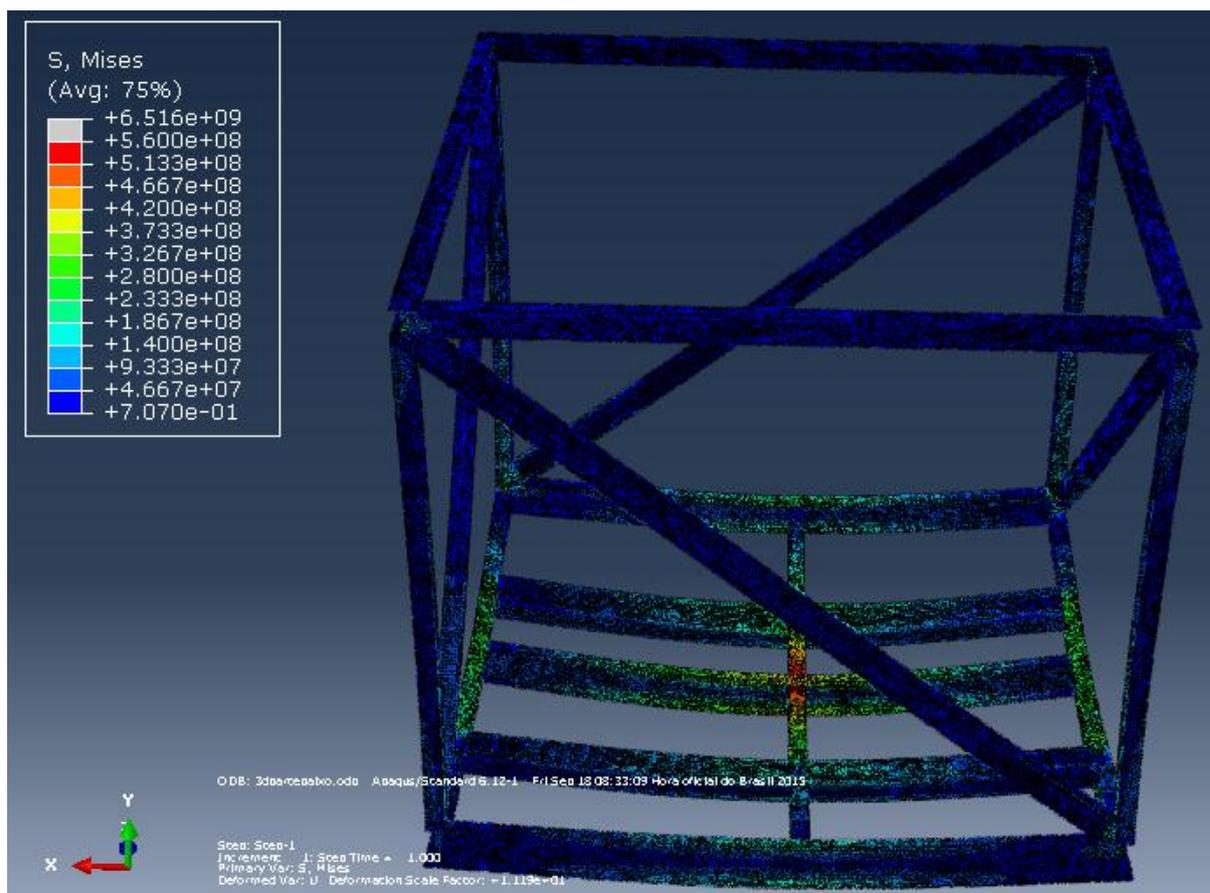


Figura 29 - Tensões na parte inferior utilizando modelo 3D com dados do caso 1

Fonte: Autoria própria

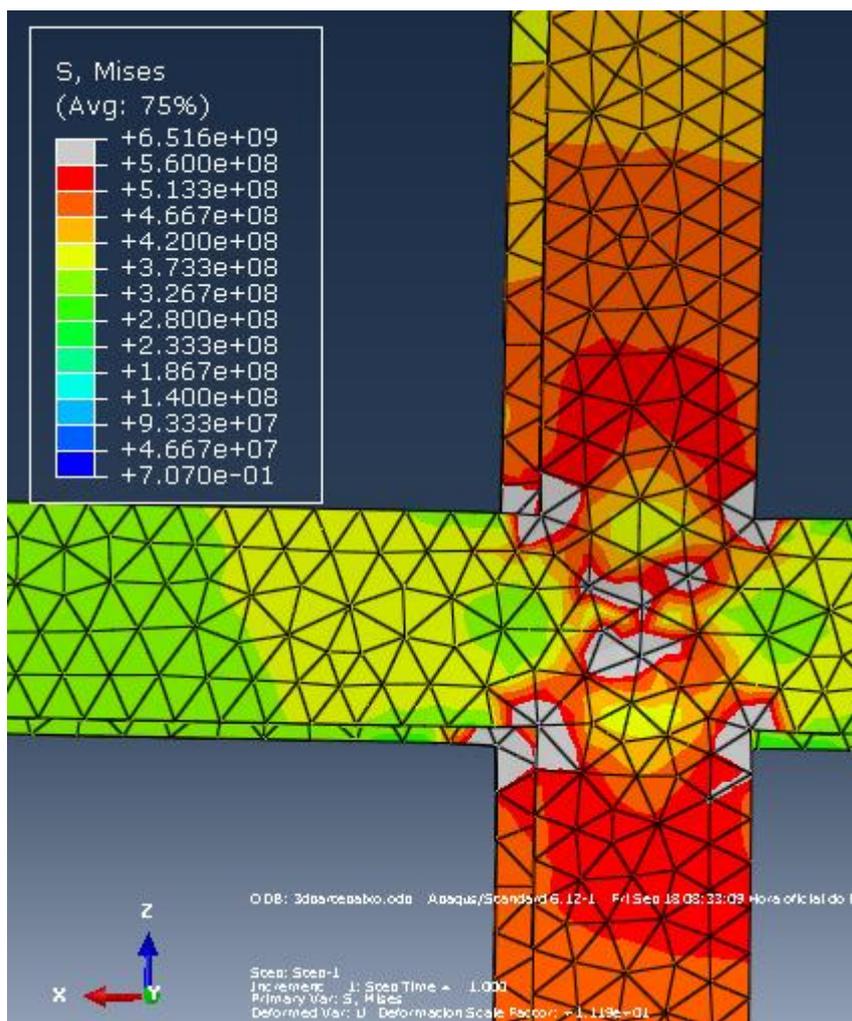


Figura 30 - Tensões na parte inferior utilizando modelo 3D com zoom

Fonte: Autoria própria

As Figura 31 e Figura 32 ilustram os carregamentos aplicados para avaliação da parte superior do *skid* referente ao caso 1, utilizando elementos de vigas e modelo 3D respectivamente. Para representar o carregamento foram aplicadas as forças referentes ao carregamento nos olhais e estes pontos foram considerados com restrição de giro. Para representar a força peso no ponto de fixação do equipamento, este ponto foi considerado como pinado, de forma a zerar o esforço que é aplicado nos olhais, que é equivalente a força peso do equipamento.

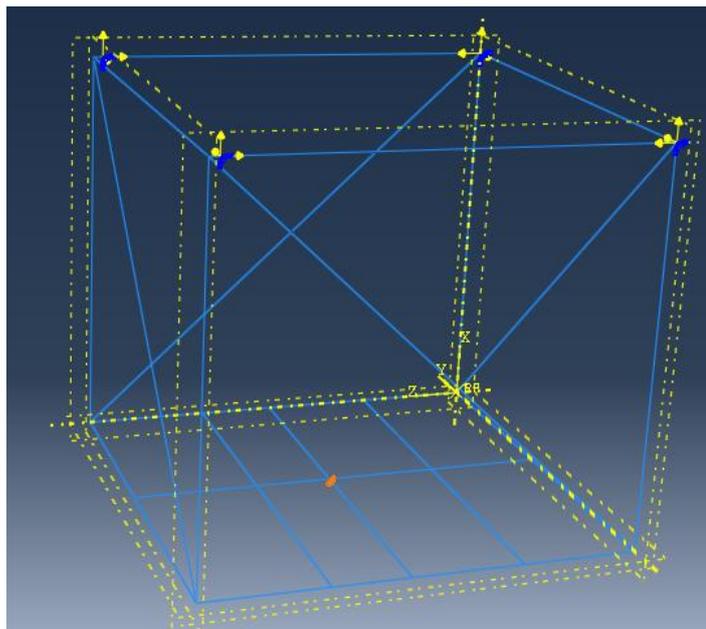


Figura 31 - Carregamento para parte superior utilizando elementos de vigas
Fonte: Autoria própria

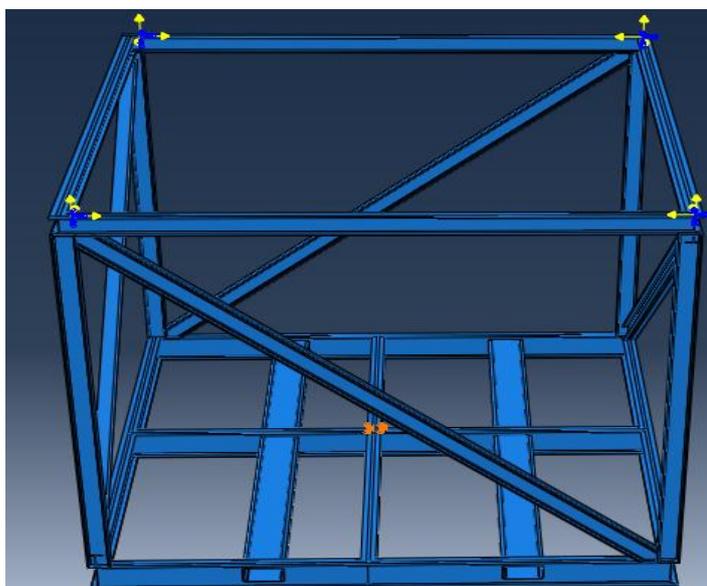


Figura 32 - Carregamento para parte superior utilizando modelo 3D
Fonte: Autoria própria

As Figura 33 e Figura 34 ilustram as tensões resultantes do caso 1 na parte superior do *skid* utilizando elementos de vigas e modelo 3D, respectivamente. Como é possível ver nas figuras as tensões máximas encontradas nas duas simulações

ficaram muito próximas uma da outra, sendo que a tensão máxima foi encontrada no pé de uma das vigas.

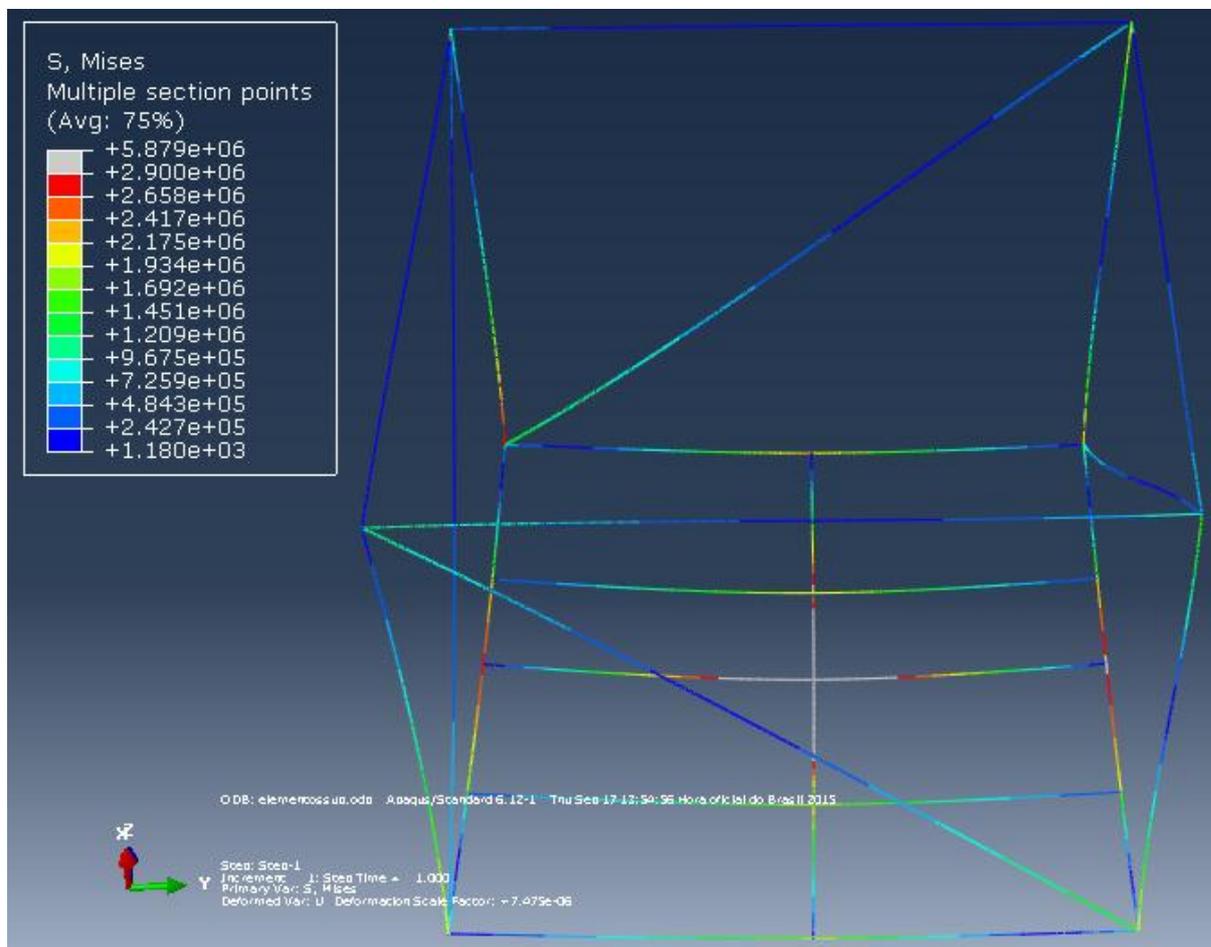


Figura 33 - Tensões na parte superior utilizando elementos de vigas com dados do caso 1

Fonte: Autoria própria

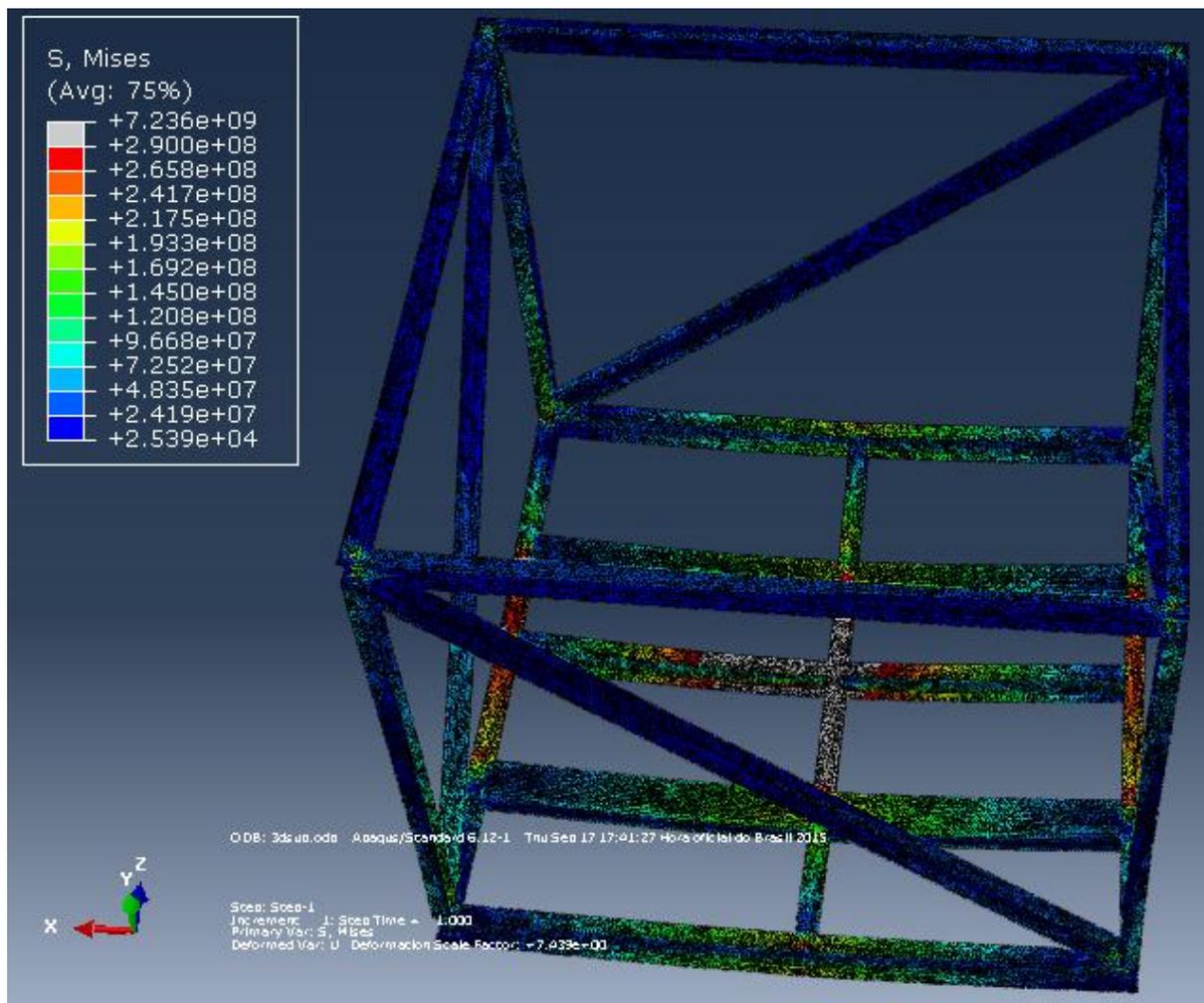


Figura 34 - Tensões na parte superior utilizando modelo 3D com dados do caso 1

Fonte: Autoria própria

Como o *skid* pode ser tanto içado pelos olhais quanto levantado pela empilhadeira, às duas situações devem ser consideradas. Dessa forma, a Figura 35 ilustra o carregamento do *skid* sendo levantado por uma empilhadeira referente ao caso 1 utilizando elementos de vigas. Já a Figura 36 ilustra o mesmo caso, mas o modelo utilizado é em 3D. Neste carregamento foi suposto que o *skid* ficou apoiado em apenas dois pontos de cada pá da empilhadeira, de forma a simular uma situação mais crítica.

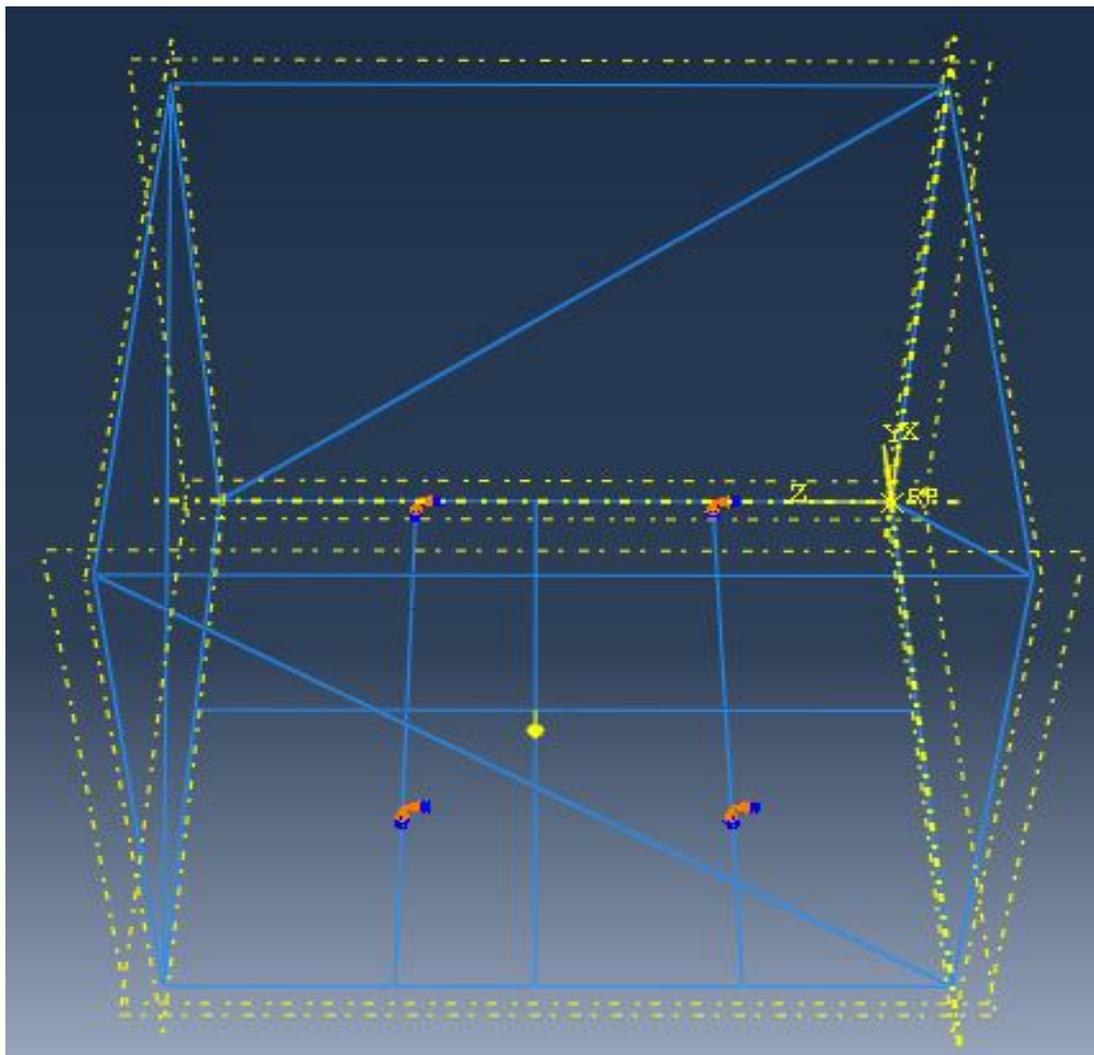


Figura 35 - Carregamento do *skid* sendo levantado por uma empilhadeira com dados do caso 1 utilizando elementos de vigas

Fonte: Autoria própria

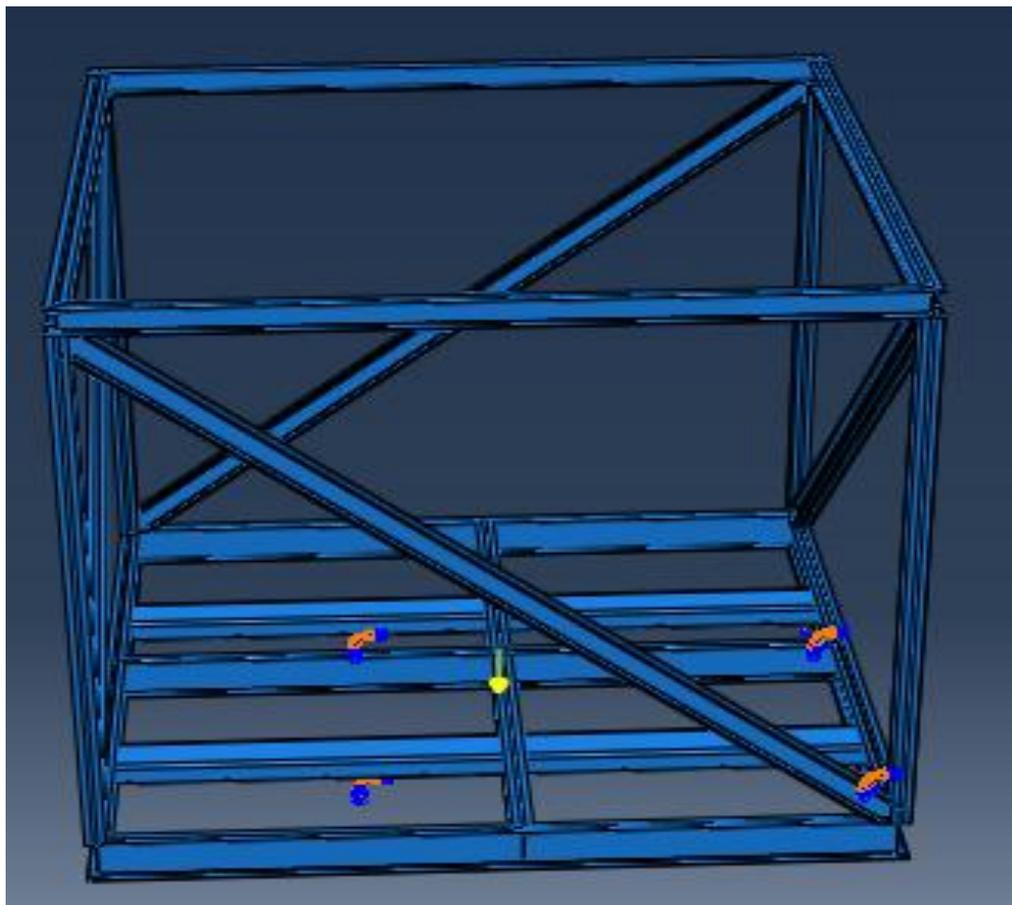


Figura 36 - Carregamento do *skid* sendo levantado por uma empilhadeira com dados do caso 1 utilizando modelo 3D

Fonte: Autoria própria

A Figura 37 ilustra as tensões no *skid* quando ele é levantado por uma empilhadeira, referente ao caso 1, utilizando elementos de vigas. A Figura 38 ilustra a mesma condição, mas com um modelo 3D. A Figura 39 é um zoom no ponto crítico na simulação da Figura 38.

Nota-se que a tensão máxima ocorre no ponto de fixação do equipamento, da mesma forma que no outro carregamento. A tensão máxima encontrada para este carregamento foi significativamente menor que no caso em que o *skid* foi içado, mostrando que este é um caso menos crítico. É importante ressaltar que a tensão no ponto crítico ficou muito próxima nos dois casos estudados.

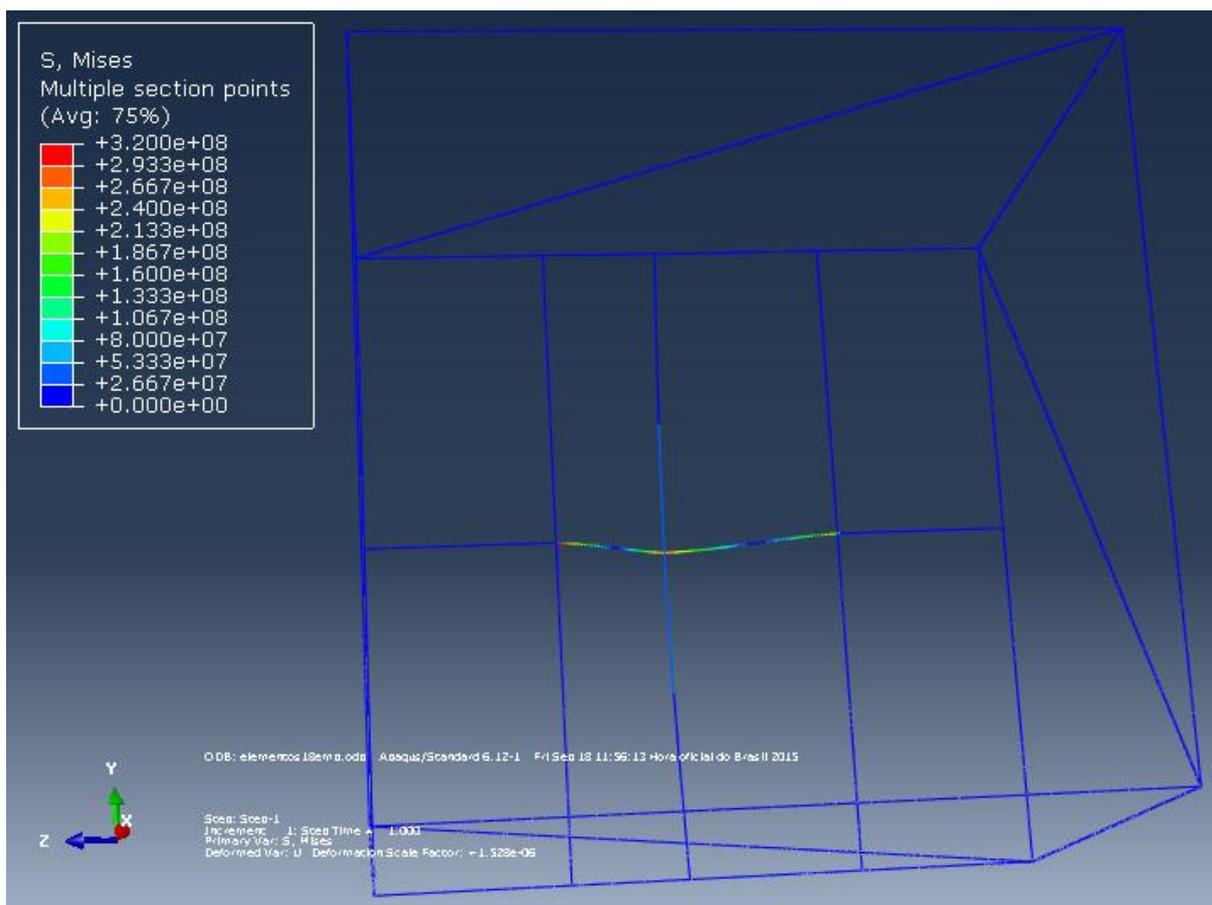


Figura 37 - Tensões do *skid* sendo levantado por uma empilhadeira com dados do caso 1 utilizando elementos de vigas

Fonte: Autoria própria

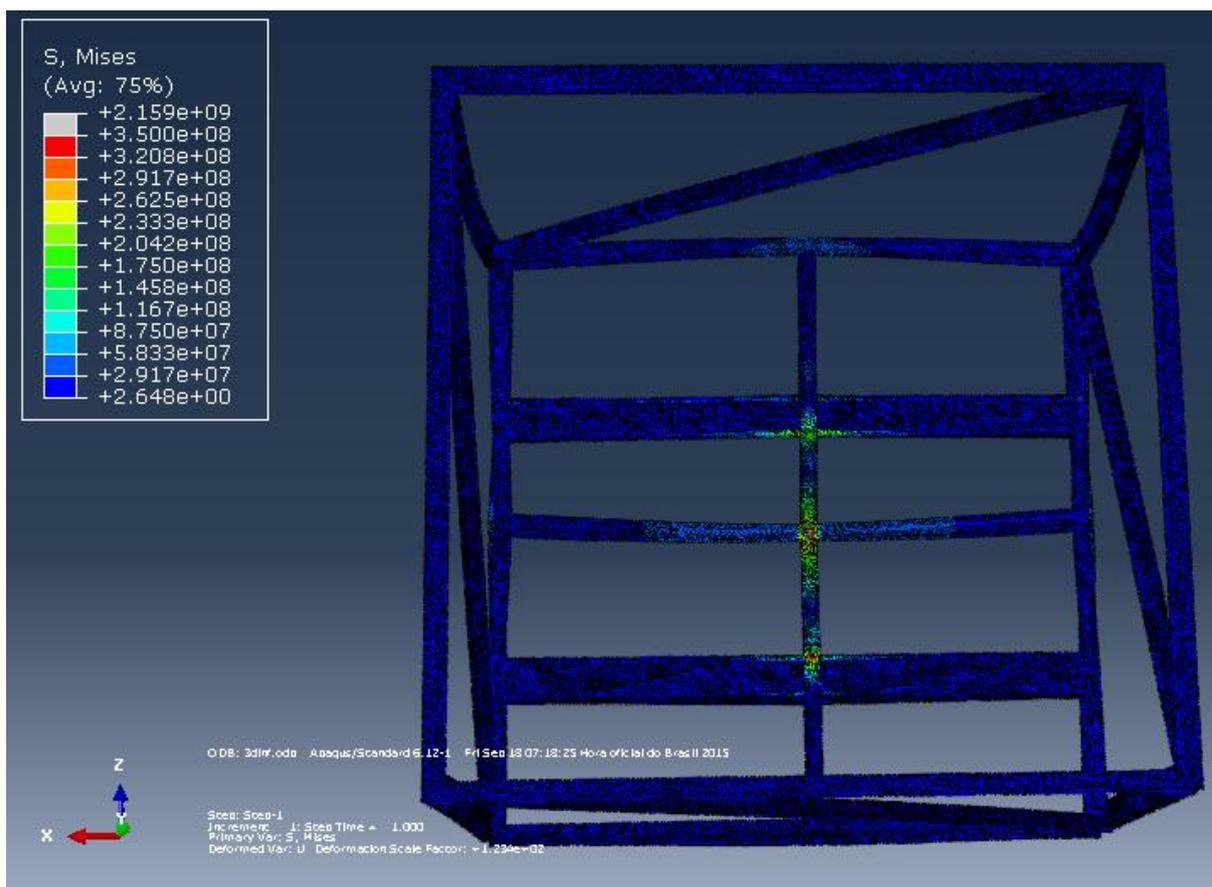


Figura 38 - Tensões do *skid* sendo levantado por uma empilhadeira com dados do caso 1 utilizando modelo 3D

Fonte: Autoria própria

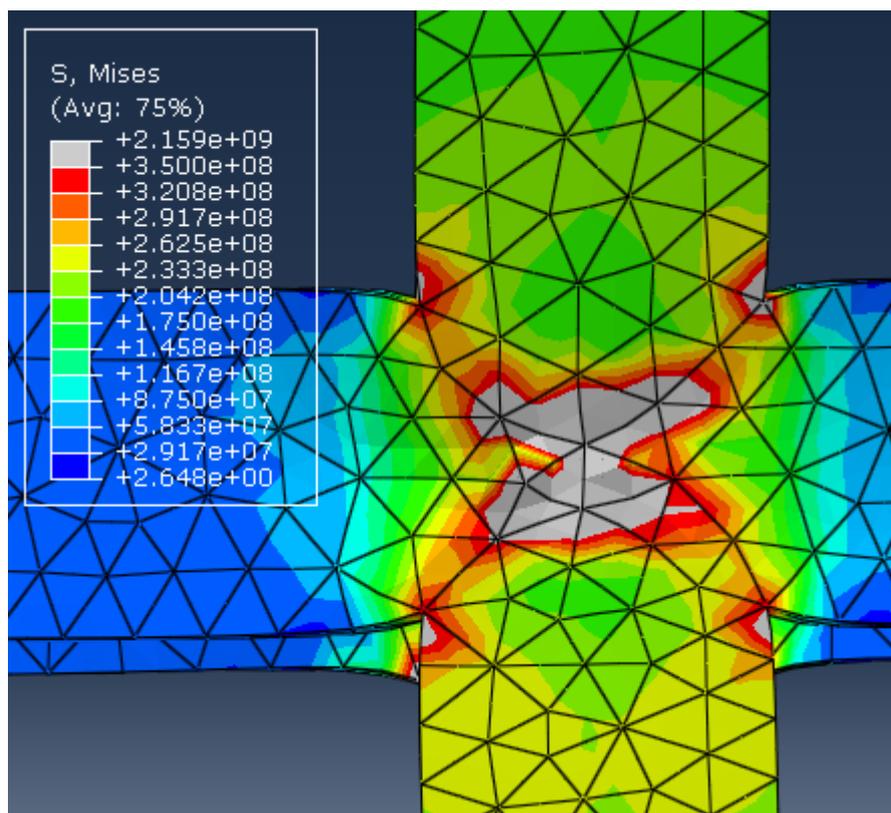


Figura 39 - Tensões do *skid* sendo levantado por uma empilhadeira com dados do caso 1 utilizando modelo 3D com zoom

Fonte: Autoria própria

4.4 Caso 3

Muitas vezes o centro geométrico do equipamento não fica exatamente sobre o ponto de fixação. Então, considera-se um momento aplicado sobre este ponto, divididos em um ponto aplicado em torno do eixo z e o outro aplicado sobre o eixo y . Dessa forma, realizou-se uma simulação no programa para avaliar os efeitos da aplicação deste momento com os mesmos dados de entrada do caso 1. A Tabela 9 mostra os dados de entrada do caso 3, que são os mesmo da simulação 1. Os resultados obtidos no caso 3 podem ser vistos na Tabela 10, sendo que os momentos foram calculados e também são mostrados nesta tabela.

Tabela 9 - Dados de entrada caso 3

CG_{eq_x} [mm]	500	σ_{esc} [MPa]	600
CG_{eq_y} [mm]	200	$Perfil_{viga}$	Tipo I
CG_{eq_z} [mm]	200	D_{emp} [mm]	1800
$Massa_{equipamento}$ [kg]	35000	Y_{eq_1} [mm]	1800
ν	0,3	Y_{eq_2} [mm]	1600
X_{eq} [mm]	3000	Z_{eq_1} [mm]	1800
Y_{eq} [mm]	3400	Z_{eq_2} [mm]	1600
Z_{eq} [mm]	3400	Z_{eq_2} [mm]	2000
E [GPa]	210	FS	1
θ [°]	30	FAD	1
$GlobalSize$ [m]	0,01		

Fonte: Autoria própria

Tabela 10 - Resultado do caso 3

$X [mm]$	3600	$F_x [N]$	90153
$Y [mm]$	4080	$F_y [N]$	31262
$Z [mm]$	4080	$F_z [N]$	32472
$Y_1 [mm]$	2160	$Viga_{sup}$	2°
$Y_2 [mm]$	1920	$Viga_{inf}$	14°
$Z_1 [mm]$	2160	$M_y [N.m]$	72122
$Z_2 [mm]$	1920	$M_z [N.m]$	72122
$Olhal [mm]$	152	$Tempo [min]$	26
$Emp_1 [mm]$	2863	$Emp_2 [mm]$	1063

Fonte: Autoria própria

A Figura 40 ilustra o carregamento utilizado nas simulações, cujos resultados são apresentados nas Figura 41 e Figura 42. Este foi um dois tipos de carregamentos padrões utilizados no programa em C para analisar a resistência do *skid*. Neste carregamento quatro forças aplicadas na posição onde ficariam os olhais simulando a força aplicada pelos cabos. Uma força o eixo vertical e dois momentos são aplicados no ponto de fixação do equipamento para simular os esforços resultantes do peso do equipamento.

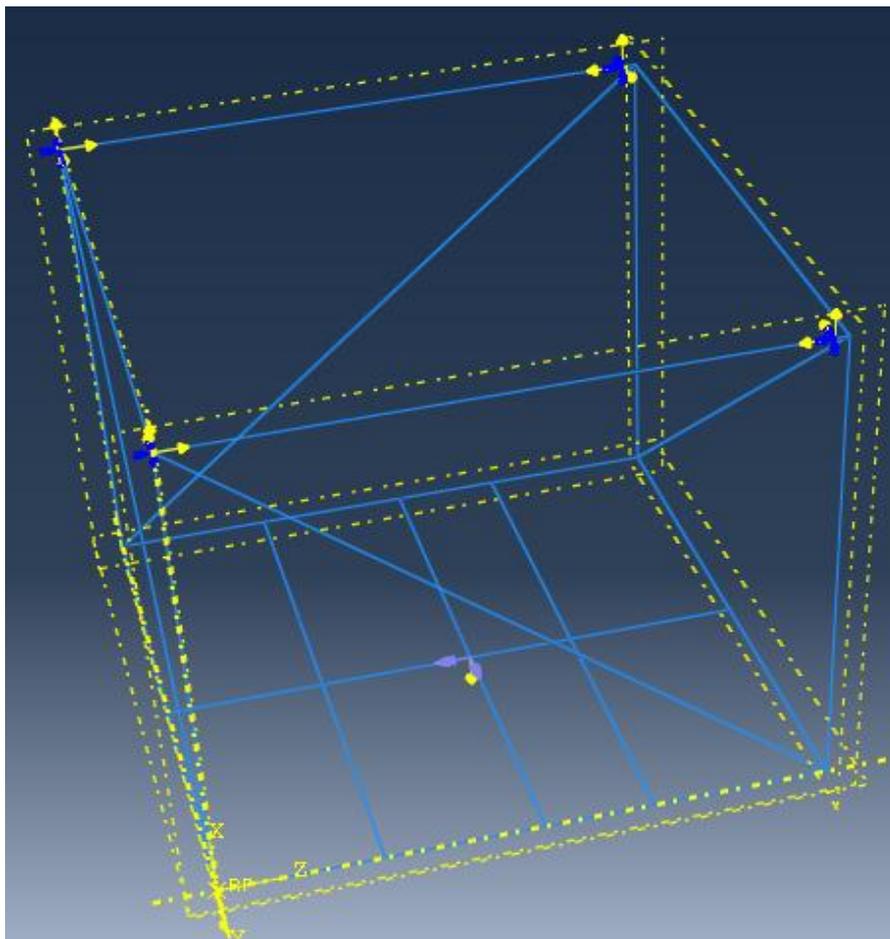


Figura 40 - Carregamento da caso 3 utilizando elementos de vigas
 Fonte: Autoria própria

A Figura 41 ilustra as tensões no *skid* da caso 3, considerando o momento no ponto de fixação e utilizando elementos de vigas. Já a Figura 42 ilustra as tensões no *skid* da caso 1, utilizando elementos de vigas e considerando o momento no ponto de fixação. Como é possível ver na Figura 42, ocorre uma diferença significativa no valor da tensão no ponto crítico com a aplicação do momento, sendo que sem considerar o momento, a tensão máxima encontrada é de 587 MPa como mostra a Figura 28, valor significativamente menor que o mostrado na Figura 42, onde o valor de 622 MPa foi encontrado. Como a tensão de escoamento do material foi considerada como 600 MPa , a estrutura falharia se o momento no ponto de fixação não fosse considerado.

O resultado mostrado na Figura 41, demonstra que a estrutura encontrada no caso 3 suporta o carregamento, pois a tensão encontrada no ponto crítico foi de $523,7 \text{ MPa}$, ficando bem abaixo do valor da tensão de escoamento do material. Também é importante ressaltar que a tensão de Von Mises, encontrada na parte superior do *skid*, é muito menor que a do ponto de fixação, mesmo com a seção da viga utilizada na parte superior sendo muito menor que a da parte inferior do *skid*.

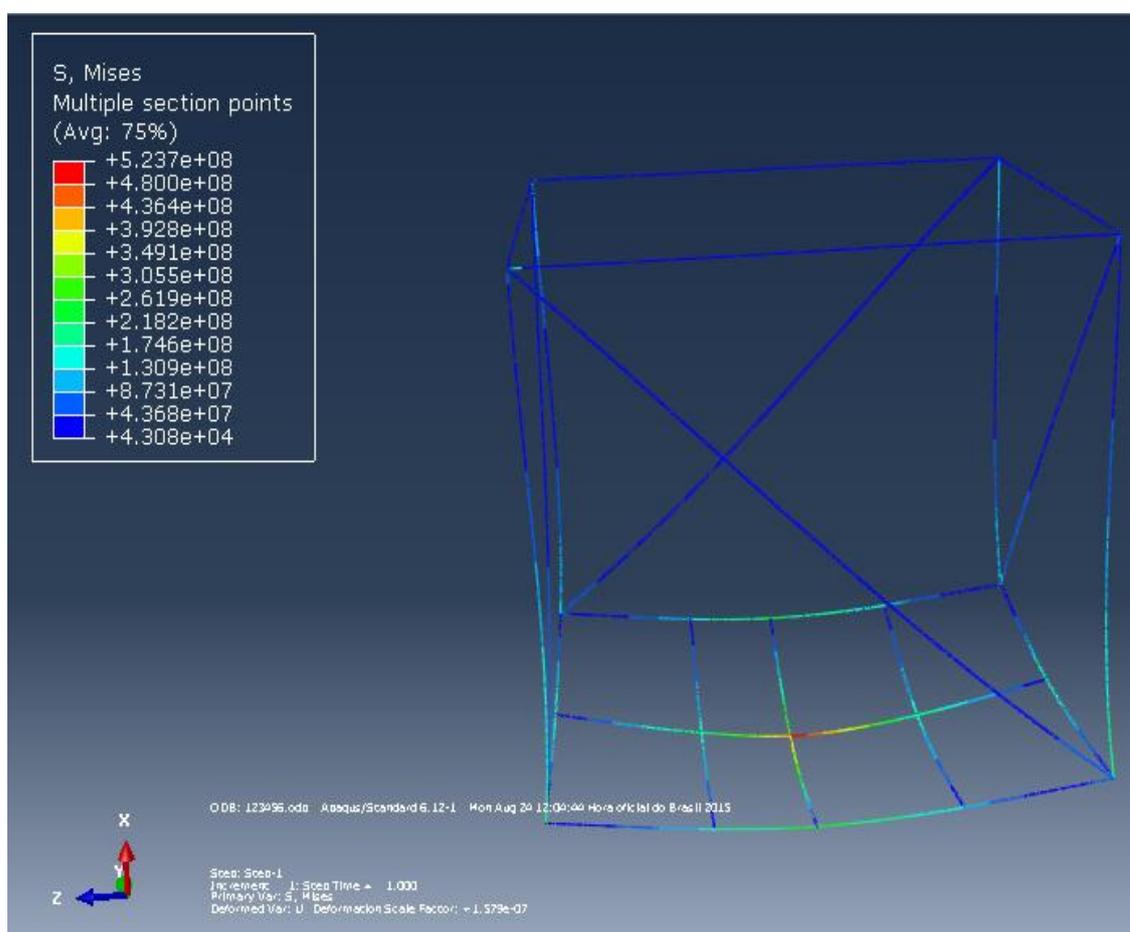


Figura 41 – Tensões considerando o momento e utilizando elementos de vigas com dados do caso 3

Fonte: Autoria própria

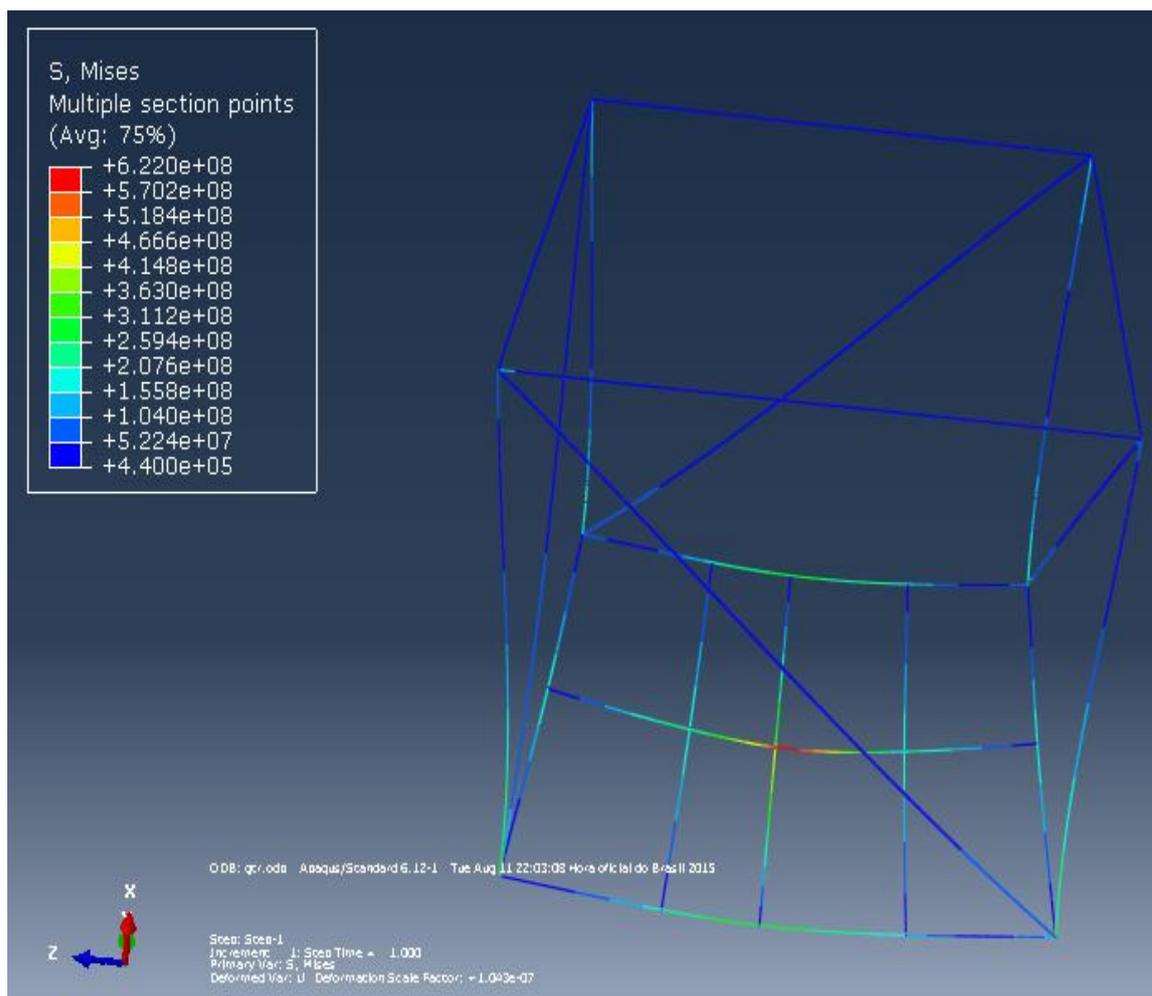


Figura 42 – Tensões utilizando elementos de vigas e considerando o momento no ponto de fixação com dados do caso 1

Fonte: Autoria própria

Como o *skid* pode ser tanto içado pelos olhais quanto levantado pela empilhadeira às duas situações devem ser consideradas. Desta forma, com os dados do caso 3 foi realizada uma simulação cujo carregamento é mostrado na Figura 43. Neste carregamento considerou-se que o *skid* ficou apoiado em apenas dois pontos das pegas da empilhadeira.

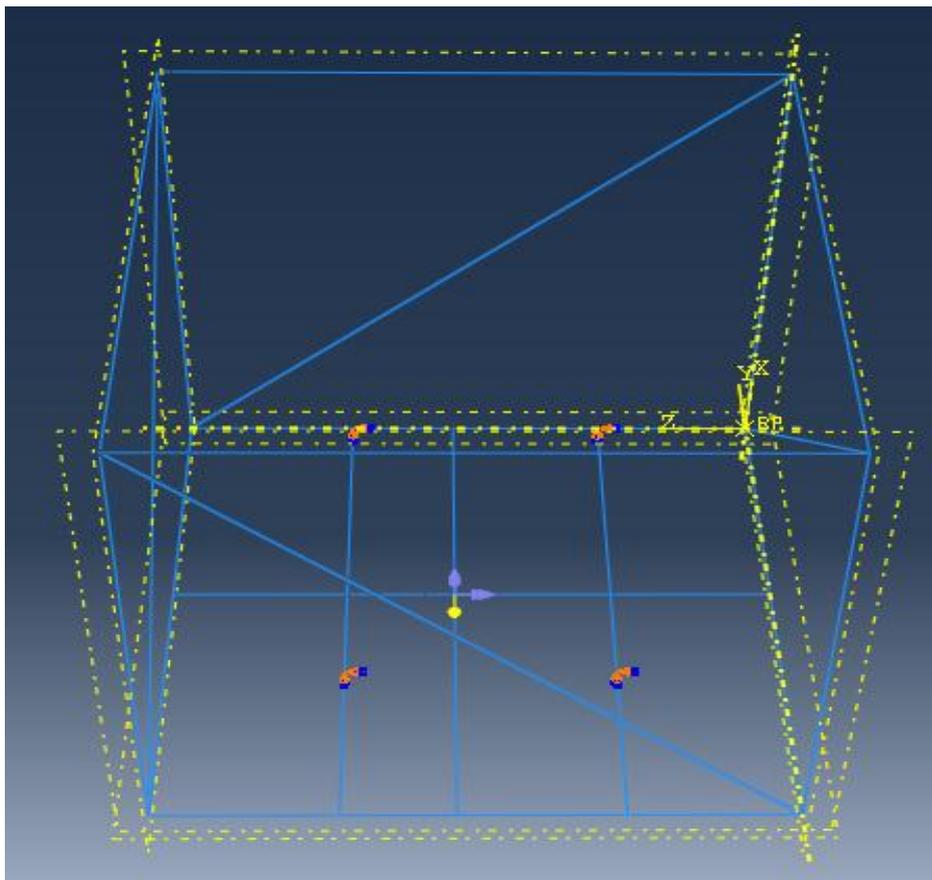


Figura 43 – Carregamento do *skid* sendo levantado por uma empilhadeira com dados do caso 3 utilizando elementos de vigas

Fonte: Autoria própria

A Figura 44 ilustra as tensões no *skid*, quando este é levantado por uma empilhadeira. Onde foi usado os dados de entrada do caso 3 e elementos de vigas. Nota-se, que as tensões encontradas nesta situação são bem menores que as mostradas na Figura 41, sendo que a tensão máxima quando o *skid* é içado foi de $523,7 \text{ MPa}$, já quando foi erguido pela empilhadeira a tensão encontrada foi de 321 MPa .

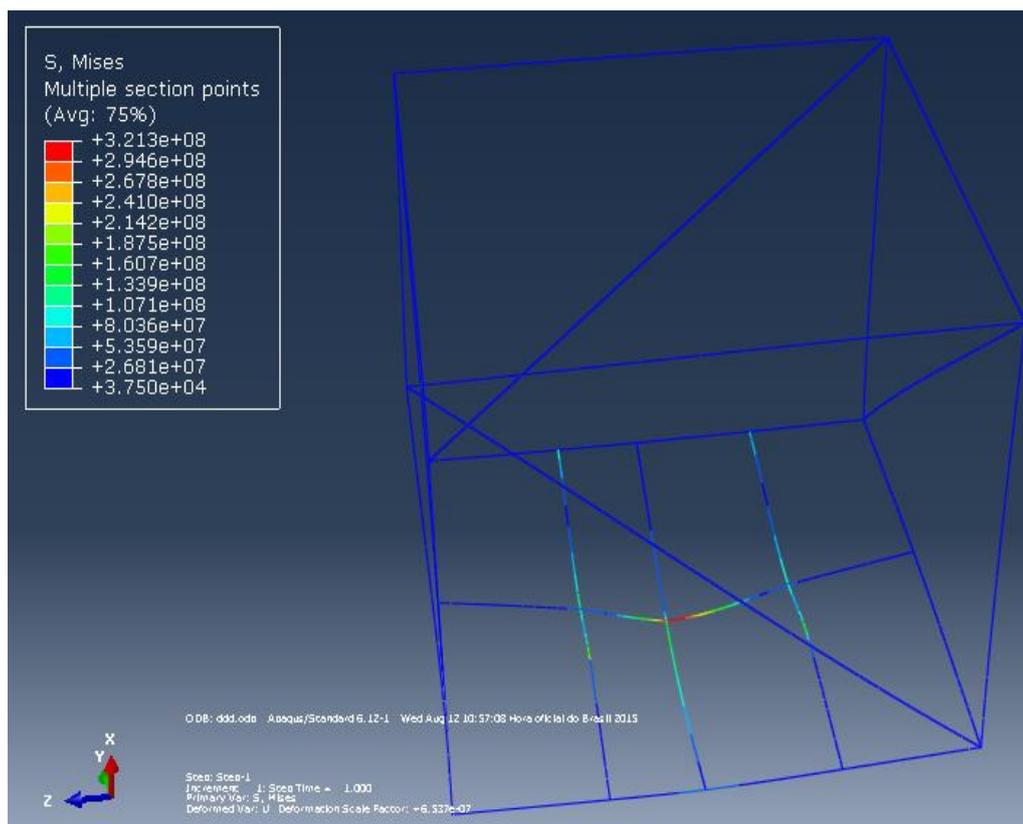


Figura 44 – Tensões do *skid* sendo levantado por uma empilhadeira com dados do caso 3 utilizando elementos de vigas

Fonte: Autoria própria

A Figura 45 ilustra o carregamento do *skid* sendo levantado por uma empilhadeira, referente ao caso 3 e utilizando elementos de vigas. Diferentemente do carregamento mostrado na Figura 44, na Figura 45 considera-se que os esforços se dividem uniformemente nas pás da empilhadeira. A força e os momentos são os mesmos da simulação da Figura 44.

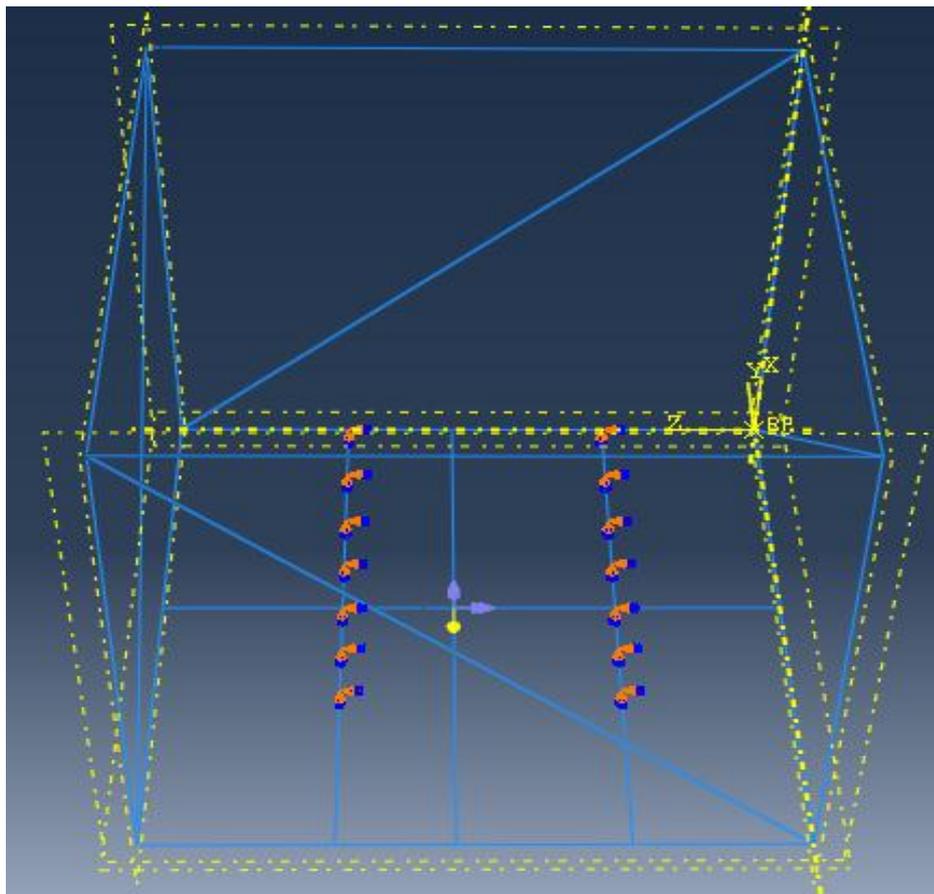


Figura 45 - Carregamento do *skid* sendo levantado por uma empilhadeira com dados do caso 3 utilizando elementos de vigas

Fonte: Autoria própria

A Figura 46 ilustra as tensões do *skid* sendo levantado por uma empilhadeira, com dados do caso 3, utilizando elementos de vigas. Onde a tensão máxima encontrada neste caso foi a menor entre os três casos de carregamentos considerados, considerando que quando foi simulado o *skid* sendo içado pelos olhais a tensão no ponto crítico foi de 523 MPa . Quando foi considerado que o *skid* foi levantado por dois pontos de engaste na empilhadeira, a tensão encontrada foi de 321 MPa e no caso da Figura 46 a tensão no ponto crítico foi de 258 MPa .

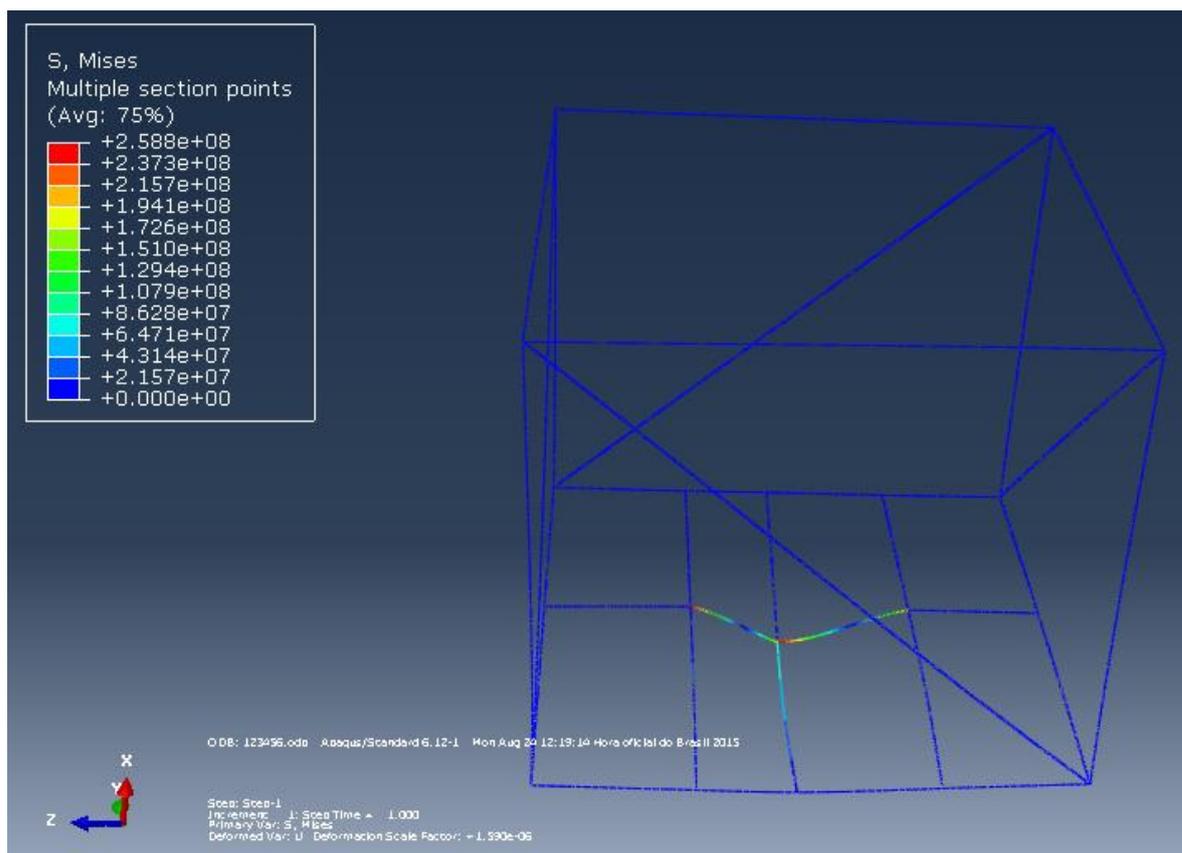


Figura 46 - Tensões do *skid* sendo levantado por uma empilhadeira com dados do caso 3 utilizando elementos de vigas

Fonte: Autoria própria

4.5 Caso 4

Para mostrar um caso real com o uso de fatores de segurança e fator de amplificação dinâmica foi realizada no programa a simulação 4, cujos dados de entrada são mostrados na Tabela 11. Como é possível ver na tabela do caso 4 difere do caso 2 apenas no peso do equipamento e no valor dos fatores. Sendo que o valor de 1,4 para o fator de amplificação dinâmica é o utilizado nos projetos da empresa e o fator de segurança escolhido foi o de 1,6 por conta da utilização de elementos de viga, sendo que nos projetos atuais é utilizando 1,5. Já a Tabela 12 ilustra os resultados do caso 4.

Tabela 11 - Dados de entrada do caso 4

$CG_{eq_x} [mm]$	500	$Perfil_{viga}$	Tipo I
$CG_{eq_y} [mm]$	200	$D_{emp} [mm]$	1700
$CG_{eq_z} [mm]$	200	$Y_{eq_1} [mm]$	2000
$Massa_{equipamento} [kg]$	16200	$Y_{eq_2} [mm]$	1700
ν	0,3	$Z_{eq_1} [mm]$	2200
$X_{eq} [mm]$	3000	$Z_{eq_2} [mm]$	2000
$Y_{eq} [mm]$	3700	FS	1,6
$Z_{eq} [mm]$	4200	FAD	1,4
$E [GPa]$	210	$GlobalSize [m]$	0,01
$\sigma_{esc} [MPa]$	600	$\theta [^\circ]$	30

Fonte: Autoria própria

Tabela 12 - Resultados do caso 4

$X [mm]$	3600	$F_x [N]$	106818
$Y [mm]$	4440	$F_y [N]$	35862
$Z [mm]$	5040	$F_z [N]$	39574
$Y_1 [mm]$	2400	$Viga_{sup}$	4°
$Y_2 [mm]$	2040	$Viga_{inf}$	14°
$Z_1 [mm]$	2640	$M_y [N.m]$	85453
$Z_2 [mm]$	2400	$M_z [N.m]$	85453
$Olhal [mm]$	140	$Tempo [min]$	27
$Emp_1 [mm]$	3440	$Emp_2 [mm]$	1599

Fonte: Autoria própria

A Figura 47 ilustra a distribuição de tensões no *skid* referente ao caso 4, quando ele é içado. A tensão máxima mostrada na figura ficou muito próxima da apresentada no caso 2, onde a massa do equipamento era de 40000 kg, muito maior que os 16200 kg utilizados no caso 4, mostrando que os dois fatores mudam significativamente os resultados.

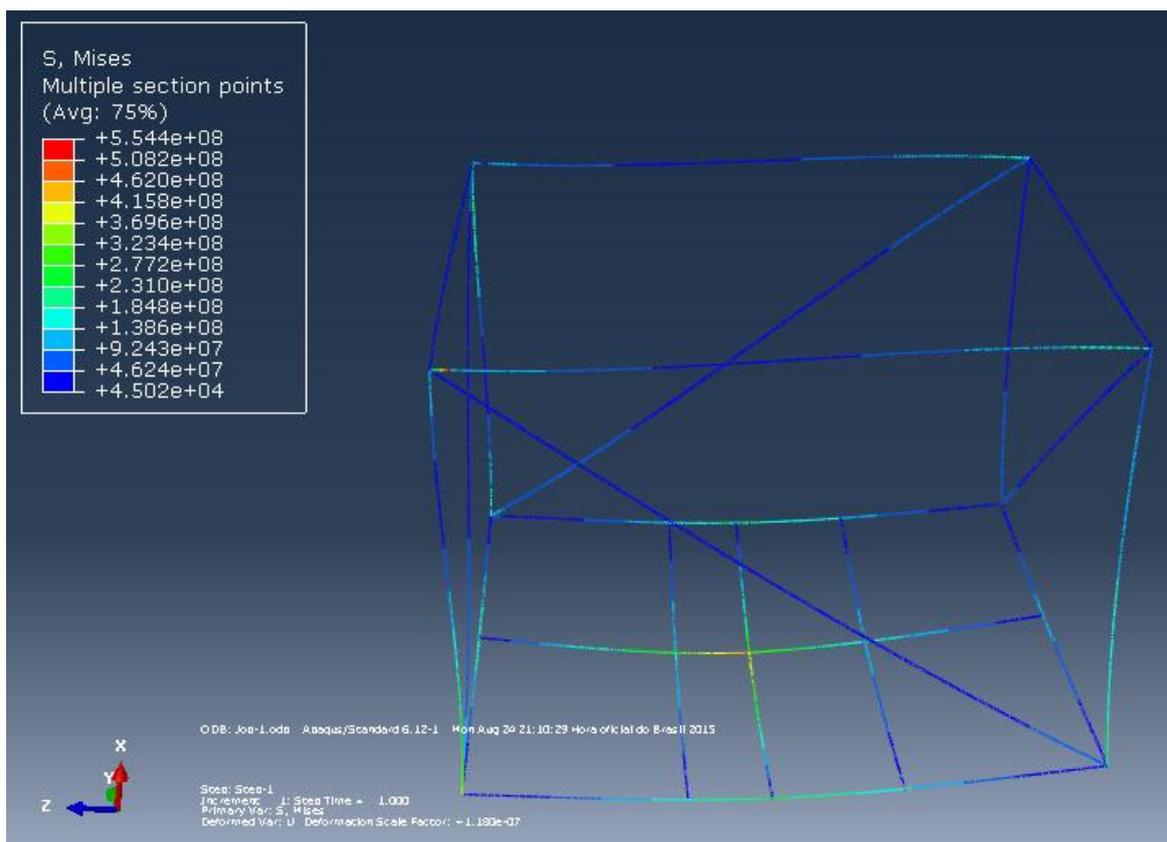


Figura 47 - Resultado do caso 4 com o *skid* sendo içado
Fonte: Autoria própria

CONCLUSÕES

Analisando os resultados apresentados pode-se afirmar que o programa na linguagem C cumpre satisfatoriamente a função para a qual ele foi designado. Com sua utilização é possível diminuir o tempo de projeto e obter de uma forma rápida um modelo simplificado com dimensões e seções de viga pré-estabelecidos. Devido à utilização de elementos de vigas não é possível fazer uma análise nos nós, e nos pontos de fixação do equipamento e olhais, ficando esta parte a cargo do projetista.

A análise dos resultados mostra que as tensões de Von Mises obtidas com elementos de vigas e utilizando o modelo 3D ficaram muito próximas. Observou-se também, que o carregamento mais crítico acontece quando o *skid* é içado, apresentando tensões até duas vezes maiores do que quando levantado pela empilhadeira. Além disso, a parte mais solicitada do *skid* é a inferior, sendo que nas três simulações do programa em C, apresentadas neste trabalho, a seção escolhida para a parte inferior foi maior que a superior.

Quanto à parte computacional, observou-se que para gerar o *script* utilizado no Abaqus ® foram necessárias muitas linhas de programação, fazendo com que o programa ficasse com mais de 1300 linhas no total. Além disso, a linguagem *Python* utilizada pelo Abaqus ® é muito sensível à mudança, sendo que pequenas modificações geram erros, e a interface com o usuário é complexa. Apesar disso, o programa foi concluído com sucesso, utilizando para seu funcionamento alguns executáveis que permitem emitir comandos no *Prompt* de comando do *Windows*, e suprir algumas carências da linguagem interna do Abaqus ®.

Em relação à seleção de perfis, foi cadastrado no programa apenas o perfil I, sendo uma sugestão para trabalhos futuros o cadastro de outros perfis e maiores catálogos para que haja mais opções para a seleção. Outro perfil muito utilizado para a confecção destes *skids* é o U, ou até mesmo tubos, que podem ser usados na parte superior da estrutura, sendo que na parte inferior é padronizado o uso de vigas I. Recomenda-se também organizar a tabela dos perfis em I de acordo com o peso indicado na tabela do ANEXO A.

Além disso, outra sugestão para trabalhos futuros é que o desenho seja gerado automaticamente no Solidworks®, para que o projetista só tenha o trabalho de modificar os pontos de fixação do equipamento e dos olhais, além de fazer uma análise nos nós. Outra opção é a realização dos cálculos no *simulation* do Solidworks e a confecção do desenho no próprio Solidworks®.

REFERÊNCIAS

AFFONSO, Italo D. **Estudo sobre o domínio de aplicação de soluções analíticas para o problema de contato entre cilindros sob condições de fretting utilizando o Abaqus**. 2012. 66 f. Trabalho de Conclusão de Curso (Graduação) – Curso Superior de Engenharia Mecânica. Universidade de Brasília, Brasília, 2012.

AMERICAN PETROLEUM INSTITUTE. **API17D: Design and Operation of Subsea Production Systems—Subsea Wellhead and Tree Equipment**. 2011, 248 p.

BEER, Ferdinand P.; JOHNSTON Jr, Elwood R. **Mecânica Vetorial para Engenheiros – Estatica**. 5.ed. São Paulo: Makron, 1994, 1 v.

BELLEI, Ildoni H.; PINHO, Fernando O.; PINHO, Mauro O. **Edifícios de Múltiplos Andares em Aço**. 2. ed. São Paulo: Pini, 2008, 556 p.

BORNSCHLEGELL, Augusto S. **CALC RPRT, TRANSPORTATION SKID XMT MEC UNLOCK TOOL FA 2011 – 60 XMT**. Curitiba, 2014, 28 p.

CBCA. **Manual de Ligações em estruturas Metálicas do Conselho Brasileiro da Construção em Aço**. 2003, 2 v.

FILHO, Luis F. L. M. **Análise estrutural e verificação da vida à fadiga de uma roda automotiva utilizando o Método dos Elementos Finitos**. 2007. 98 f. Trabalho de Conclusão de Curso (Graduação) – Curso Superior de Engenharia Mecânica. Escola Politécnica da Universidade de São Paulo, São Paulo, 2007.

FISH, Jacob; BELYTSCHKO, Ted. **Um Primeiro Curso em Elementos Finitos**. Rio de Janeiro: LTC, 2009, 241 p.

GUERRA, Gabriel M.; CANELAS, Alfredo; HERSKOVITS, José. **Proceedings. IBERIAN LATIN AMERICAN CONGRESS ON COMPUTATIONAL METHODS IN ENGINEERING, 27. Desenvolvimento e implementação de interface entre um pacote comercial de (MEF) e um algoritmo de complementaridade aplicado a problema de contato**. Belém: Ibérico Congresso Latino-Americano de Métodos Computacionais em Engenharia, 2006.

JUNIOR, Gilberto K.; FERREIRA, Robson A.; REGNEL, Sergio K. **Processo de seleção de perfis estruturais utilizados em suportes de equipamentos offshore**. 2009. 110 f. Trabalho de Conclusão de Curso (Graduação) – Curso Superior de Engenharia Mecânica. Universidade Positivo, Curitiba, 2006.

KOSTESKI, Luis E. **Aplicação do método dos elementos finitos discretos formados por barras no estudo do colapso de estruturas**. 2012. 177 f. Tese – Doutorado em Engenharia Mecânica. Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2012.

MACHADO, Ivan G.; Novos Paradigmas para Especificação de Juntas Soldadas. **Soldagem & Inspeção**. São Paulo, Vol.17, Nº. 3, p.278-288, Jul/Set. 2012.

MEIRELES, José F. B. **Análise dinâmica de estruturas por modelos de elementos finitos identificados experimentalmente**. 2007. 344 f. Tese – Doutorado em Engenharia Mecânica. Universidade do Minho, Guimarães, 2007.

MERIAM, James L. **Mecânica para Engenharia: Estática**. 6. ed. Rio de Janeiro: LTC, 2009, 1 v.

MOAVENI, Saeed. **Finite Element Analysis – Theory and Application with ANSYS**. 3rd. ed. Rio de Janeiro: Prentice-Hall, 1999, 527 p.

OLIVEIRA, Sérgio D. G. **Modelção e simulação numérica em estruturas aeronáuticas reforçadas**. 2010. 74 f. Tese – Mestrado em Engenharia Mecânica. Universidade de Aveiro, Aveiro, 2010.

OKUMURA, Toshie; TANIGUCHI, Célio. **Engenharia de soldagem e aplicações**. Rio de Janeiro : LTC, 1982, 456 p.

PEDREIRA, Fernando L. A. B. **Análise comparativa de soluções de coberturas metálicas de grandes vãos em perfis tubulares**. 2012. 111 f. Trabalho de Conclusão de Curso (Graduação) – Curso Superior de Engenharia Civil. Universidade Federal do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, 2012.

PFEIL, Walter; PFEIL, Michèle. **Estruturas de Aço: Dimensionamento Prático**. 8. ed. Rio de Janeiro: LTC, 2009, 357 p.

PINHO, André G. **Modelação e otimização de ferramentas de conformação plástica de chapa**. 2013. 128 f. Tese – Mestrado em Engenharia Mecânica. Universidade de Aveiro, Aveiro, 2013.

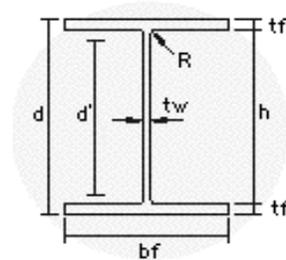
SORIANO, Humberto L. **Método de Elementos Finitos em Análise de Estruturas**. São Paulo. Universidade de São Paulo, 2002, 48 v.

SÜSSEKIND, José C. **Curso de Análise Estrutural, Volume 1** (Estruturas isostáticas). 4. ed. Porto Alegre: Globo, 1979, 1 v.

TORII, André J. **Análise dinâmica de estruturas com o método dos elementos finitos generalizado**. 2012. 223 f. Tese – Pós-Graduação em Métodos Numéricos em Engenharia. Universidade Federal do Paraná, Curitiba, 2012.

ZATTONI, Célio C. **Perfis Metálicos e Laminados Planos**. São Paulo: FATEC-SP, 2008.

ANEXO A – PERFIS METÁLICOS TIPO “W”



Perfis W

d = altura externa do perfil
 d' = altura livre da alma
 h = altura interna
 bf = largura da aba
 tf = espessura da aba
 tw = espessura da alma
 R = raio da concordância

BITOLA mm x kg/m	Massa Linear Kg/m	d mm	bf mm	ESPESSURA		h mm	d' mm	Área cm ²	EIXO X - X				EIXO Y - Y				rt cm	It cm ⁴	Esbeltez		Cw cm ⁶	u m ² /
				tw mm	tf mm				Ix cm ⁴	Wx cm ³	rx cm	Zx cm ³	Iy cm ⁴	Wy cm ³	ry cm	Zy cm ³			Aba - λf bf/2tf	Alma - λw d'/tw		
13,0	13	148	100	4,3	4,9	138	118	16,6	635	85,8	6,18	96,4	82	16,4	2,2	25,5	2,6	1,72	10,2	27,49	4.181	0,67
18,0	18	153	102	5,8	7,1	139	119	23,4	939	123	6,34	139	126	24,7	2,3	38,5	2,7	4,34	7,18	20,48	6.683	0,69
24,0	24	160	102	6,6	10,3	139	115	31,5	1384	173	6,63	198	183	35,9	2,4	55,8	2,7	11,1	4,95	17,48	10.206	0,69
15,0	15	200	100	4,3	5,2	190	170	19,4	1305	131	8,2	148	87	17,4	2,1	27,3	2,6	2,05	9,62	39,44	8.222	0,77
19,3	19,3	203	102	5,8	6,5	190	170	25,1	1686	166	8,19	191	116	22,7	2,1	35,9	2,6	4,02	7,85	29,31	11.098	0,79
22,5	22,5	206	102	6,2	8	190	170	29	2029	197	8,37	226	142	27,9	2,2	43,9	2,6	6,18	6,38	27,42	13.868	0,79
17,9	17,9	251	101	4,8	5,3	240	220	23,1	2291	183	9,96	211	91	18,1	2	28,8	2,5	2,54	9,53	45,92	13.735	0,88
22,3	22,3	254	102	5,8	6,9	240	220	28,9	2939	231	10,1	268	123	24,1	2,1	38,4	2,5	4,77	7,39	37,97	18.629	0,89
25,3	25,3	257	102	6,1	8,4	240	220	32,6	3473	270	10,3	311	149	29,3	2,1	46,4	2,6	7,06	6,07	36,1	22.955	0,89
21,0	21	303	101	5,1	5,7	292	272	27,2	3776	249	11,8	292	98	19,5	1,9	31,4	2,4	3,27	8,86	53,25	21.628	0,98
23,8	23,8	305	101	5,6	6,7	292	272	30,7	4346	285	11,9	333	116	22,9	1,9	36,9	2,5	4,65	7,54	48,5	25.594	0,99
28,3	28,3	309	102	6	8,9	291	271	36,5	5500	356	12,3	412	158	31	2,1	49,4	2,6	8,14	5,73	45,2	35.441	1
32,9	32,9	349	127	5,8	8,5	332	308	42,1	8358	479	14,1	548	291	45,9	2,6	72	3,2	9,15	7,47	53,1	84.111	1,17
39,0	39	353	128	6,5	10,7	332	308	50,2	10331	585	14,4	668	375	58,6	2,7	91,9	3,3	15,8	5,98	47,32	109.551	1,18
44,0	44	352	171	6,9	9,8	332	308	57,7	12258	697	14,6	784	818	95,7	3,8	148	4,4	16,7	8,72	44,7	239.091	1,35

Fonte: Junior; Ferreira; Regnel, 2006