

**UNIVERSIDADE DE CAXIAS DO SUL  
CENTRO DE CIÊNCIAS EXATAS E DA TECNOLOGIA  
CURSO DE ENGENHARIA MECÂNICA**

**LEONIDAS MUNARO MORSOLIN**

**ANÁLISE DE TENSÕES EM GUINDASTE ARTICULADO UTILIZANDO MÉTODO  
DE ELEMENTOS FINITOS COM BASE NA NORMA ABNT NBR 14768**

**CAXIAS DO SUL**

**2014**

**LEONIDAS MUNARO MORSOLIN**

**ANÁLISE DE TENSÕES EM GUINDASTE ARTICULADO UTILIZANDO MÉTODO  
DE ELEMENTOS FINITOS COM BASE NA NORMA ABNT NBR 14768**

Relatório de Estágio II, apresentado à  
Universidade de Caxias do sul como requisito  
para obtenção do título de Bacharel no curso de  
Engenharia Mecânica.

Supervisor:

Prof. Leandro Luís Corso, Dr. Eng.

**CAXIAS DO SUL**

**LEONIDAS MUNARO MORSOLIN**

**ANÁLISE DE TENSÕES EM GUINDASTE ARTICULADO UTILIZANDO MÉTODO  
DE ELEMENTOS FINITOS COM BASE NA NORMA ABNT NBR 14768**

Relatório de Estágio II, apresentado à  
Universidade de Caxias do sul como requisito  
para obtenção do título de Bacharel no curso de  
Engenharia Mecânica.

**Aprovado em 28 de novembro de 2014**

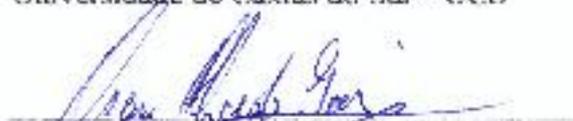
**Banca Examinadora**



Prof. Dr. Leandro Luis Corso  
Universidade de Caxias do Sul – UCS



Prof. Dr. Alexandre Vieceli  
Universidade de Caxias do Sul – UCS



Prof. Dr. Oscar Alfredo Garcia de Suarez  
Universidade de Caxias do Sul - UCS

Dedico este trabalho ao meu pai, pela  
inspiração ao estudo da mecânica

## **AGRADECIMENTOS**

Agradeço a Deus pela iluminação contínua.

A minha esposa e minha enteada, pelo companheirismo e apoio nesta jornada.

Ao meu pai, minha mãe e meus irmãos por me ensinarem com exemplos, a hombridade e perseverança.

Ao Prof. Leandro Luís Corso, pelo ensinamento, dedicação, empenho e pela grande amizade.

## RESUMO

Neste trabalho foi realizada a análise estrutural do produto guindaste hidráulico articulado por meio da utilização do método de elementos finitos, com base fundamentada na norma ABNT NBR 14768. Foi desenvolvida uma metodologia com a criação de um modelo global, cuja intenção foi encontrar tensões críticas nos principais componentes estruturais. Também foi desenvolvido um modelo local destacando os contatos de dois componentes com o intuito de se obter um resultado mais preciso. Para tanto, foram desenvolvidos modelos computacionais do equipamento em 3D e criados os modelos para posterior análise estrutural. Em seguida, foram definidas as condições de contorno conforme recomendados pela norma, e aplicados nos modelos. O modelo do equipamento verificado apresentou, em alguns pontos, tensões acima do limite definido como seguro, desta forma, foram sugeridas alterações da geometria em pontos críticos que na sequência foram analisadas em um novo modelo de elementos finitos, comprovando a eficácia das alterações.

Palavras Chave: Análise estrutural, guindaste articulado hidráulico, método de elementos finitos, análise global-local, ABNT NBR 14768.

## **ABSTRACT**

In this work a structural analysis of articulated hydraulic cranes product by using finite element method was performed, and based on ABNT NBR 14768. A methodology to create a global model, which was intended to find critical tensions in key structural components, was developed. A local model was also developed, highlighting the contact between two components in order to obtain a more accurate result. Therefore, models of equipment were developed and created 3D models for finite elements. Then the boundary conditions were set as recommended by the standard, and applied models. The model of that equipment at some points, presented stress level above the limit defined as safe, thus the geometry changes were suggested at critical points. In the sequence these points were analyzed in a new finite element model, proving the effectiveness thoses changes.

Key words: Structural analysis, articulated hydraulic crane, finite element method, global-local analysis, ABNT NBR 14768.

## LISTA DE FIGURAS

Figura 1 - Corpo sem deformação e corpo com deformação .....	17
Figura 2 - Corpo sem deformação e corpo com deformação por cisalhamento .....	18
Figura 3- Curvas de tensão-deformação para diferentes tipos de aços.....	19
Figura 4 - Representação de tensões triaxiais.....	20
Figura 5 - Distribuições de tensões causadas por uma carga concentrada em uma barra retangular (largura b e espessura t) engastada. ....	22
Figura 6 - Diferentes tipos de elementos finitos.....	24
Figura 7 - Malha gerada em um elemento de placa com orifício central .....	25
Figura 8 - Convergência de resultados das análises de elementos finitos .....	26
Figura 9 - Ciclo de convergência.....	27
Figura 10 - Diversos componentes de rigidez representados tal como uma mola .....	28
Figura 11 - Representação do equilíbrio dos elementos de uma treliça .....	30
Figura 12 - Decomposição das forças nos eixos X e Y .....	31
Figura 13 - Elemento viga com suas diversas transmissões de forças .....	32
Figura 14 - Geometria arbitrária modelada com elementos triangulares de casca.....	34
Figura 15 - Componente modelado com elementos sólidos tetraédricos .....	35
Figura 16 - Gráfico de carga do equipamento TKA 23.700.....	40
Figura 17 - Vista explodida dos principais componentes e modelo global do guindaste.....	41
Figura 18 - Fluxograma para o Modelo de Elementos Finitos .....	42
Figura 19 - Demonstração das Forças Envolvidas .....	43
Figura 20 - Guindaste modelado em casca.....	47
Figura 21 - Modelo Local.....	47
Figura 22 - Velocidade máxima de içamento (Modelo Global).....	49
Figura 23 - Velocidade máxima de içamento (Modelo Local).....	50
Figura 24 - Modelo Global com condições de contorno e carregamentos .....	52
Figura 25 - Malha do Modelo Global.....	53
Figura 26 - Modelo Local.....	54
Figura 27 - Malha com elementos de sólido do Modelo Local.....	54
Figura 28 - Distribuição de tensões no modelo Global .....	55
Figura 29 - Pontos de concentração de tensão na Capa da Lança (MPa).....	56
Figura 30 - Deslocamentos do Modelo Global (mm).....	56
Figura 31 - Distribuição de tensões de von Mises no Modelo Local (MPa).....	57

Figura 32 - Concentrações de Tensões do Modelo Local (MPa) .....	58
Figura 33 - Gráfico do deslocamento com a convergência da malha.....	59
Figura 34 - Componentes sugeridos para a melhoria .....	59
Figura 35 - Componente (A), com e sem alterações (medidas em mm) .....	60
Figura 36 - Modelo Local Capa da Lança .....	61
Figura 37 - Distribuição das tensões de Von Mises do modelo modificado (MPa).....	62
Figura 38 - Pontos de concentração de tensão no modelo modificado (MPa) .....	62

## LISTA DE TABELAS

Tabela 1 - Valores de $\Phi_{2,min}$ e $\beta_2$ .....	37
Tabela 2 - Valores de $V_h$ .....	37
Tabela 3 - Combinações de Cargas .....	38
Tabela 4 - Propriedades mecânicas do Domex 600.....	40
Tabela 5 - Fator de segurança admissíveis para aços estruturais não ligados .....	44
Tabela 6 - Propriedades do Equipamento.....	48
Tabela 7 - Velocidades Máximas Verticais .....	50
Tabela 8 - Fatores Dinâmicos.....	51
Tabela 9 - Cargas do Modelo Global.....	51
Tabela 10 - Cargas do Modelo Local .....	51

## SUMÁRIO

<b>1</b>	<b>INTRODUÇÃO .....</b>	<b>13</b>
1.1	JUSTIFICATIVA.....	14
1.2	OBJETIVOS.....	15
1.3	Delimitações.....	15
<b>2</b>	<b>REFERENCIAL TEÓRICO .....</b>	<b>16</b>
2.1	INTRODUÇÃO.....	16
2.2	EQUILÍBRIO DE TENSÕES .....	16
<b>2.2.1</b>	<b>Estado de Tensão em um Ponto .....</b>	<b>16</b>
2.3	RELAÇÃO ENTRE DESLOCAMENTO E DEFORMAÇÃO .....	17
<b>2.3.1</b>	<b>Deformação Normal .....</b>	<b>17</b>
<b>2.3.2</b>	<b>Deformação por Cisalhamento.....</b>	<b>18</b>
2.4	LEI DE HOOKE GENERALIZADA E RELAÇÃO CONSTITUTIVA PARA MATERIAIS ISOTRÓPICOS .....	19
2.5	FATOR DE SEGURANÇA .....	21
2.6	CRITÉRIO DE VON MISES.....	21
2.7	PRINCÍPIO DE SAINT-VENANT.....	22
2.8	PRINCÍPIOS BÁSICOS DO MÉTODO DE ELEMENTOS FINITOS .....	23
<b>2.8.1</b>	<b>Tipos de Elementos Finitos.....</b>	<b>24</b>
<b>2.8.2</b>	<b>A Malha dos Elementos Finitos.....</b>	<b>25</b>
<b>2.8.3</b>	<b>A Condição de Contato .....</b>	<b>27</b>
<b>2.8.4</b>	<b>Modelo Unidimensional .....</b>	<b>28</b>
<b>2.8.5</b>	<b>Elemento Bidimensional .....</b>	<b>30</b>
<b>2.8.6</b>	<b>Elemento de Barra Bidimensional .....</b>	<b>30</b>
<b>2.8.7</b>	<b>Elemento de viga.....</b>	<b>32</b>
<b>2.8.8</b>	<b>Elemento de Placa .....</b>	<b>33</b>
<b>2.8.9</b>	<b>Elemento de Casca.....</b>	<b>33</b>
<b>2.8.10</b>	<b>Elemento Sólido .....</b>	<b>34</b>
2.9	ANÁLISE LOCAL-GLOBAL .....	35
2.10	DADOS DA NORMA NBR 14768 (2012) PARA APLICAÇÃO DO MODELO. ...	36
<b>2.10.1</b>	<b>Fatores Dinâmicos .....</b>	<b>36</b>
<b>2.10.2</b>	<b>Combinações de Cargas.....</b>	<b>37</b>
<b>3</b>	<b>DESENVOLVIMENTO DOS MÉTODOS.....</b>	<b>39</b>

3.1	INTRODUÇÃO.....	39
3.2	DESCRIÇÃO DO PRODUTO GUINDASTE ARTICULADO HIDRÁULICO .....	39
3.3	ETAPAS.....	41
<b>3.3.1</b>	<b>Modelagem computacional do guindaste com seus principais componentes.....</b>	<b>41</b>
<b>3.3.2</b>	<b>Criação do modelo de elementos finitos .....</b>	<b>42</b>
<b>3.3.3</b>	<b>Verificação da segurança dos modelos com relação à análise estrutural.....</b>	<b>43</b>
<b>3.3.4</b>	<b>Propostas de melhoria no produto tendo como base os resultados da análise ...</b>	<b>45</b>
<b>4</b>	<b>ANÁLISE NUMÉRICA DO GUINDASTE TKA 23.700 .....</b>	<b>46</b>
4.1	CRIAÇÃO DOS MODELOS DE ELEMENTOS FINITOS .....	46
4.2	OBTENÇÃO DOS DADOS PARA AS CONDIÇÕES DE CONTORNO .....	48
4.3	CONDIÇÕES DE CONTORNO DO MODELO.....	51
<b>4.3.1</b>	<b>Condições de Contorno do Modelo Global .....</b>	<b>52</b>
<b>4.3.2</b>	<b>Condições de Contorno do Modelo Local .....</b>	<b>53</b>
4.4	RESULTADOS DAS ANÁLISES DAS TENSÕES .....	54
<b>4.4.1</b>	<b>Resultados das Análises de Tensões do Modelo Global .....</b>	<b>55</b>
<b>4.4.2</b>	<b>Resultados das Análises de Tensões do Modelo Local .....</b>	<b>57</b>
4.5	PROPOSTAS DE MELHORIAS DO PROJETO.....	59
4.6	CONSIDERAÇÕES FINAIS .....	62
<b>5</b>	<b>CONCLUSÃO .....</b>	<b>64</b>

## 1 INTRODUÇÃO

O grande crescimento da construção civil, gerado pelo aquecimento econômico brasileiro e tendenciado por eventos como Copa do Mundo 2014 e Olimpíadas 2016, além dos programas de aceleração do crescimento (PAC), faz dos guindastes uma ferramenta em evidência neste cenário. A movimentação de cargas pesadas tem se tornado cada vez mais frequente sempre em que se busca rapidez e agilidade em atividades que variam desde as agrícolas até construções civis e industriais.

Contudo, as diversas solicitações de carregamentos que estes equipamentos sofrem em suas mais variadas aplicações, tornam indispensável que em seu projeto prive pela estabilidade estrutural e segurança dos mesmos.

O mercado europeu de guindastes, um dos mais tradicionais e exigentes, conta com inúmeros fabricantes, dentre as quais alguns dos mais expressivos mundialmente. Com uma vasta experiência em construção e aplicação de guindastes suas normas também são referências. A norma EN 12999:2002, específica para projetos de guindastes hidráulicos articulados, faz uma rigorosa classificação dos equipamentos, referenciando-os pelas diversas aplicações, separando por grupos e indicando quais são os fatores de segurança indicados para os mesmos. Esta norma serviu como base para a Associação Brasileira de Normas Técnicas (ABNT), complementar à norma brasileira NBR 14768 (2012).

Considerando-se todos estes aspectos, este trabalho tem por objetivo fazer um levantamento bibliográfico e a criação de modelos para análises computacionais, baseando-se na norma NBR 14768 como instrução de cálculos.

Atualmente, muitos fabricantes de guindastes articulados validam seus produtos por meio de procedimentos que ensaiam fisicamente a estrutura, a fim de verificar se a estrutura está em conformidade com o que pretendido pelo projeto. Conforme norma NBR 14768 (2012), estes ensaios devem testar o equipamento estaticamente e dinamicamente. Os testes estáticos consistem em aplicar cargas pelo menos igual a 1,25 vezes à capacidade nominal nas posições e configurações onde o guindaste apresente as tensões máximas. Já no teste dinâmico a carga de ensaio deve ser de pelo menos 1,1 vezes a carga nominal, e a mesma deve ser posta a prova em todos os movimentos do guindaste onde o mesmo apresenta as tensões máximas.

## 1.1 JUSTIFICATIVA

Guindastes hidráulicos articulados são utilizados sempre em que se busca versatilidade, agilidade e precisão em elevações e movimentações de cargas. Em serviço, estes equipamentos muitas vezes são exigidos ao máximo, operando próximo de suas capacidades de carga nominais. Somados a isso, muitos fatores contribuem para possíveis colapsos estruturais, como força do vento, irregularidades do terreno e oscilações da carga em elevação. Com esta preocupação a TKA Guindastes Indústria e Comércio tem o foco em projetos e fabricação de guindastes articulados. Situada na cidade de Flores da Cunha, na Serra Gaúcha, a TKA conta com ampla rede de representantes que atendem em todos os estados brasileiros.

Com uma variada linha de guindastes e a tendência de diversificar ainda mais, a TKA Guindastes entende que seus produtos devem oferecer uma vida útil longa e que suas estruturas não falhem com as cargas para as quais foram projetadas. Com esta preocupação a análise de elementos finitos torna-se uma ferramenta importante para análises estruturais do equipamento ainda na concepção de seu projeto. Detectar possíveis falhas estruturais, ainda no projeto, elimina o risco de grandes desperdícios de materiais e recursos, levando em conta as complexidades de fabricação, e ao mesmo tempo em que aumenta a confiabilidade do equipamento para com o trabalho que será submetido.

Atualmente no Brasil, embora o mercado de guindastes continue em aquecimento, a tecnologia de guindastes articulados carece de estudos mais específicos. A Associação brasileira de Normas Técnicas possui diversas normas para equipamentos de elevação de carga, porém até 2012, antes de complementar a norma NBR 14768 (2012) com especificações dos requisitos mínimos para projetos, cálculos, inspeções e ensaios de guindastes articulados hidráulicos, a associação não possuía procedimentos de projetos para tais equipamentos.

Entre outros motivos, a não existência de documentos normativos nacionais para guindastes articulados, impediu o desenvolvimento de trabalhos de pesquisa e estudos sobre a área, uma vez que poucas eram as exigências de projetos e fabricação de guindastes articuladas. Tendo em considerações tais preocupações, este trabalho propõe um desenvolvimento de procedimentos de análise estrutural através do método de elementos finitos, a fim de que todas as solicitações técnicas propostas pela norma NBR 14768 (2012) sejam avaliadas e adaptadas para assegurar que os equipamentos estejam de acordo com o que rege a norma.

## 1.2 OBJETIVOS

Este trabalho tem por objetivo geral a avaliação da segurança de guindaste por meio de norma NBR14768 (2002), e com a utilização do método de elementos finitos.

Para atingir o objetivo geral, selecionaram-se os seguintes objetivos específicos:

- a) Modelar computacionalmente o guindaste com seus principais componentes.
- b) Criar um modelo de elementos finitos.
- c) Extrair dados da norma para aplicação no modelo a ser ensaiado.
- d) Verificar a segurança dos modelos com relação à análise estrutural.
- e) Propor melhorias no produto tendo como base os resultados da análise.

## 1.3 Delimitações

O presente trabalho tem por objetivo analisar estruturalmente modelos com fins acadêmicos, não se responsabilizando por eventuais aplicações práticas dos mesmos. Também não serão realizadas validações experimentais ou ensaios físicos e suas análises se darão por meio de um software comercial de elementos finitos.

## 2 REFERENCIAL TEÓRICO

### 2.1 INTRODUÇÃO

Atualmente, o método de elementos finitos é utilizado amplamente em diversas áreas da engenharia. Antes do aparecimento do método de elementos finitos, devido a sua complexidade, as análises eram a geometrias homogêneas e simples com a solução de equações de derivadas parciais. Segundo Azevedo (2003), o método de elementos finitos teve origem nas décadas de 50 e 60, com os trabalhos de Courant, Argyris e Clough, este último, introduziu o termo “elementos finitos” que após os anos 60 teve uma grande expansão, sobretudo com o avanço das tecnologias. Na atualidade, o método está inserido em diversos softwares comerciais com interface com o usuário cada vez mais intuitiva, o que colabora ainda mais para a sua popularidade e aplicações nos mais diversos procedimentos de análise.

A seguir será apresentanda uma revisão bibliográfica dos principais conceitos da mecânica que serão aplicados no desenvolvimento deste trabalho, assim como também uma introdução ao método de elementos finitos que será utilizado na análise do produto em questão.

### 2.2 EQUILÍBRIO DE TENSÕES

De acordo com Shiglei, Mischke e Budynas (2005), para um equilíbrio de forças em um determinado sistema estejam em equilíbrio, é preciso que todas as forças e momentos que atuem se balanceiem, de modo que a soma de todos os vetores de força e momento que estão atuando sobre o sistema seja zero.

#### 2.2.1 Estado de Tensão em um Ponto

Segundo Hibbeler (2004), a determinação da distribuição das cargas internas é de fundamental importância na resistência dos materiais. A força e o momento que atuam em um determinada seção representam os efeitos resultantes da distribuição da força nesta seção. É importante também, considerar que o material apresenta uma distribuição uniforme de matéria e sem falhas.

Ainda conforme Hibbeler (2004), subdividindo a seção em áreas muito pequenas, tendendo a zero, e considerando as forças que atuam em direções normais e tangentes, estas

forças também tenderão a zero. Entretanto, a relação entre força e área tende a um limite finito. A intensidade da força, por unidade de área, que atua no sentido perpendicular a seção é chamada de *tensão normal*, podendo ser positiva e chamada de tensão de tração, ou negativa, chamada de tensão de compressão. A intensidade da força que atua no sentido tangencial à mesma unidade de área é chamada de *tensão de cisalhamento*, e atuam nos dois planos perpendiculares a área.

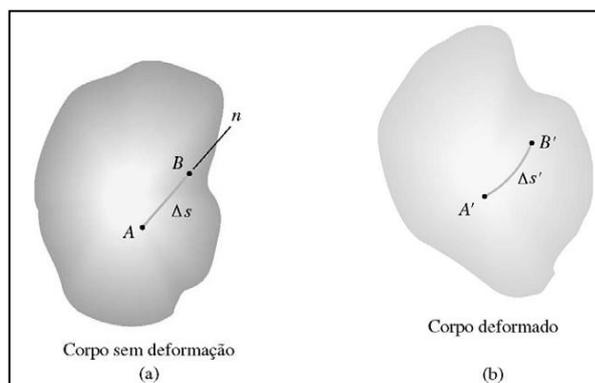
## 2.3 RELAÇÃO ENTRE DESLOCAMENTO E DEFORMAÇÃO

Quando uma carga é aplicada sobre um ponto do corpo, este irá apresentar alguma deformação, principalmente na direção da carga. Considerando a vizinhança infinitesimal deste ponto e que estes pontos vizinhos se deslocam acompanhando estes esforços aplicados no corpo. Este deslocamento pode variar ao longo do corpo, e em alguns casos os deslocamentos podem existir sem que haja deformação quando os deslocamentos são associados à translação e/ou rotações como um todo.

### 2.3.1 Deformação Normal

Segundo Hibbler (2004), deformação normal é o alongamento ou a contração de um segmento de reta por unidade de comprimento. Considerando a reta sem deformação  $AB$  ilustrado na Figura 1, localizada ao longo da reta  $n$  e tendo o comprimento original de  $\Delta s$ . Na Figura 1b o corpo deformado deslocou os pontos  $A$  e  $B$  para as posições  $A'$  e  $B'$  e tornando a reta em curva com comprimento  $\Delta s'$ , portanto a diferença de comprimento é  $\Delta s' - \Delta s$ .

Figura 1 - Corpo sem deformação e corpo com deformação



Fonte: Hibbler (2004)

Utilizando o símbolo  $\epsilon_{\text{méd}}$  (épsilon) para definir a deformação normal média tem-se a equação (1):

$$\epsilon_{\text{méd}} = \frac{\Delta s' - \Delta s}{\Delta s} \quad (1)$$

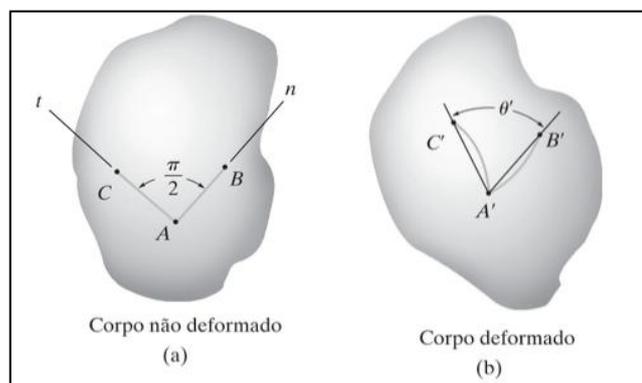
Se for adotado o ponto  $B$  cada vez mais próximos do ponto  $A$ , o comprimento da reta torna-se cada vez menor, tendendo a zero. Com isso, também, após a deformação o ponto  $A'$  aproxima-se de  $B'$ , de modo que o comprimento da curva se aproxime de zero. Se a deformação normal for conhecida e adaptando-se a equação anterior, pode-se saber de forma aproximada o comprimento final de um segmento de reta menor na direção conhecida, tem-se então a equação 2.

$$\Delta s' \approx (1 - \epsilon)\Delta s \quad (2)$$

### 2.3.2 Deformação por Cisalhamento

Conforme Hibbler (2004), a deformação de cisalhamento é a mudança de ângulo de dois segmentos de reta que no estado inicial eram perpendiculares entre si. Conforme a Figura 2a, pode-se ver no corpo não deformado dois segmentos de reta,  $AB$  e  $AC$ , ambos com origem em  $A$  e perpendiculares entre si, a primeira na direção de  $n$  e a segunda na direção de  $t$ . Na Figura 2b é possível ver as os segmentos agora deformados e com suas extremidades deslocadas e com as retas curvadas.

Figura 2 - Corpo sem deformação e corpo com deformação por cisalhamento



Fonte: Hibbler (2004)

O ângulo é medido em radianos (rad) e representado por  $\gamma$  (gama), após a deformação o ângulo entre as retas que ligam as extremidades dos pontos deslocados em A é  $\theta'$ , conforme figura 2b. Contudo, definindo a deformação por cisalhamento do ponto A relacionados com os eixos n e t, com isso tem-se a equação 3:

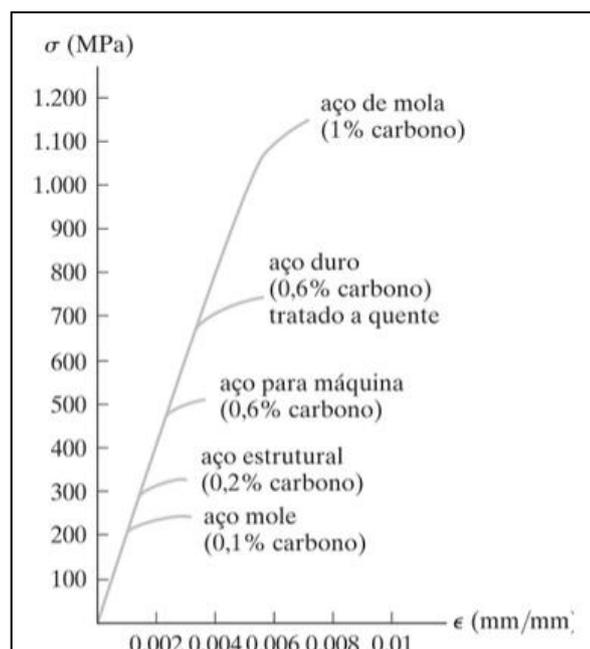
$$\gamma_{nt} = \frac{\pi}{2} - \lim_{\substack{B \rightarrow A \text{ eixo } n \\ C \rightarrow A \text{ eixo } t}} \theta' \quad (3)$$

Observando que, se o ângulo  $\theta'$  é menor que  $\pi/2$  a deformação cisalhante é positiva, entretanto, se for maior a deformação é negativa.

#### 2.4 LEI DE HOOKE GENERALIZADA E RELAÇÃO CONSTITUTIVA PARA MATERIAIS ISOTRÓPICOS

Segundo Gere (2009), muitos materiais empregados na engenharia, como a maioria dos metais, madeiras, polímeros e cerâmicas, têm um comportamento elástico e linear quando inicialmente carregados. Ou seja, estes materiais possuem curvas tensão-deformação lineares na região elástica, que com o aumento da tensão tem um aumento proporcional na deformação, como se pode ver nas curvas tensão-deformação para alguns aços estruturais da Figura 3.

Figura 3- Curvas de tensão-deformação para diferentes tipos de aços



Fonte: Hibbeler (2004)

Quando um material apresenta deformação elástica e com um comportamento linear entre tensão e deformação, este material é denominado de elástico linear. Materiais que apresentam estes comportamentos devem ser avaliados com bastante importância na hora de se projetar e aplicar, pois se deseja que componentes estruturais trabalhem dentro deste regime elástico.

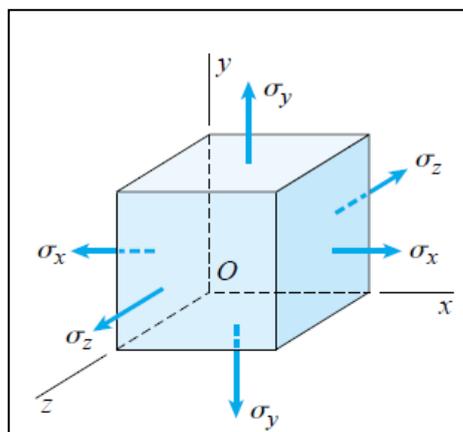
Conforme Gere (2009), a relação linear entre tensão e deformação para um determinado material que é submetido à tração ou compressão simples é expresso pela equação 4. Em que  $\sigma$  é a tensão axial,  $\epsilon$  é a deformação axial e  $E$  é uma constante de proporcionalidade denominada módulo de elasticidade ou módulo de Young.

$$\sigma = E\epsilon \quad (4)$$

Ainda segundo Gere (2009), a equação 4 é conhecida como a lei de Hooke, em homenagem a Robert Hooke, primeiro cientista a estudar as propriedades elásticas dos materiais. Esta equação é na verdade uma simplificação da lei de Hooke, porque considera apenas tensões e deformações longitudinais resultantes de trações e compressões simples. Para avaliar casos mais complexos devemos utilizar a equações expandidas da lei de Hooke.

Para analisar casos que não envolvam somente cargas axiais em barras delgadas devemos considerar um estado tridimensional de tensões cujas componentes axiais representadas em coordenadas cartesianas nas vizinhanças de um ponto são mostradas na figura 4, produzindo tensões normais  $\sigma_x$ ,  $\sigma_y$  e  $\sigma_z$ . Segundo Beer (1995), tem-se um estado múltiplo de carregamento, ou um carregamento multiaxial.

Figura 4 - Representação de tensões triaxiais



Fonte: Gere (2009)

Segundo Beer (1995), para expressar as componentes de deformação nos três sentidos em função de suas respectivas tensões será baseado no princípio da superposição. Este princípio mostra que o efeito provocado por carregamentos combinados podem ser avaliados separadamente e combinando-se os resultados. Contudo, as tensões não devem exceder o limite de elasticidade do material e nem se as tensões de uma face causar deformação em outra face, interferindo nos cálculos desta segunda face. A generalização da Lei de Hooke para carregamentos multiaxiais pode ser expressa pelas equações 5, 6 e 7.

$$\epsilon_x = +\frac{\sigma_x}{E} - \frac{\nu\sigma_y}{E} - \frac{\nu\sigma_z}{E} \quad (5)$$

$$\epsilon_y = -\frac{\nu\sigma_x}{E} + \frac{\sigma_y}{E} - \frac{\nu\sigma_z}{E} \quad (6)$$

$$\epsilon_z = -\frac{\nu\sigma_x}{E} - \frac{\nu\sigma_y}{E} + \frac{\sigma_z}{E} \quad (7)$$

## 2.5 FATOR DE SEGURANÇA

Segundo Hibbeler (2004), o fator de segurança ( $s$ ) é a relação entre o limite de resistência e a carga admissível. Projetistas utilizam deste método para restringir a carga, que uma determinada estrutura irá trabalhar, em um valor abaixo do que a estrutura pode suportar de forma integral, e com isso garantir sua integridade diante das diversas variáveis admitidas no projeto. Se o material em análise obedecer a um comportamento linear e elástico, então é possível expressar o fator de segurança em relação ao limite de resistência  $S_{ut}$  e a tensão admissível  $\sigma_{adm}$ , conforme expresso pela equação 8:

$$s = \frac{S_{ut}}{\sigma_{adm}} \quad (8)$$

O limite de resistência pode ser obtido em ensaios de tração de corpo de prova. O fator de segurança deve ser sempre maior que 1, e deve ser determinado avaliando o tipo de material e sua aplicação.

## 2.6 CRITÉRIO DE VON MISES

Segundo Shigley (2005), a teoria de distorção prevê que o escoamento ocorre quando a energia de deformação por distorção em uma unidade de volume exceda a energia de deformação por distorção da mesma unidade de volume correspondente ao escoamento do

material sobre a ação de tração ou compressão. Esta teoria originou pelo fato de que o escoamento não se dá em absoluto pelo fenômeno simples de tração e compressão.

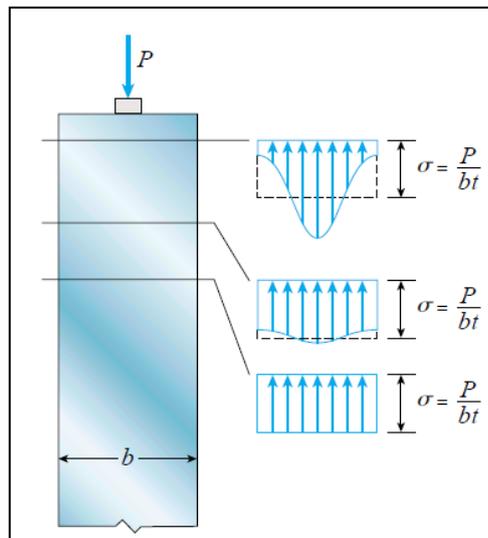
Com o intuito de se obter uma tensão de referência para a análise estrutural ou equivalente para o estado geral de tensões provocado pelas componentes de tensões  $\sigma_1$ ,  $\sigma_2$  e  $\sigma_3$ , a equação 9, denominada tensão de von Mises deve ser utilizada.

$$\sigma' = \left[ \frac{(\sigma_1 - \sigma_2)^2 + (\sigma_2 - \sigma_3)^2 + (\sigma_3 - \sigma_1)^2}{2} \right]^{\frac{1}{2}} \quad (9)$$

## 2.7 PRINCÍPIO DE SAINT-VENANT

Conforme visto anteriormente, todo o metal, dentro de determinados limites, tem um comportamento linear-elástico e que quando um corpo é submetido a uma carga, o mesmo tende a deformar elasticamente. Considerando a Figura 5, pode-se notar uma barra com fixação rígida e com seção retangular com a aplicação de uma carga concentrada aplicada na extremidade da mesma.

Figura 5 - Distribuições de tensões causadas por uma carga concentrada em uma barra retangular (largura  $b$  e espessura  $t$ ) engastada.



Fonte: Gere (2009)

Pode-se perceber nos gráficos de distribuição de tensão que quanto mais distante da extremidade em que a carga esta atuando, mais uniforme é a distribuição da tensão. Contudo, pode-se dizer que em uma distância suficientemente longe da aplicação da carga a

deformação causada pela carga se anula. Segundo Hibbeler (2004), essa distância é pelo menos igual a maior dimensão da seção transversal, no caso da figura 5, a seção onde o gráfico apresenta tensões uniforme está no mínimo a uma distância  $b$  da extremidade. Porém esta regra não se aplica a todas as formas de elementos ou carregamentos, como em elementos de paredes finas.

Segundo Hibbeler (2004), este comportamento é denominado princípio de Saint-Venant. Este princípio diz que as tensões e deformações tendem a se distribuir uniformemente nas regiões suficientemente distantes do local onde se é aplicado a carga.

Portanto, segundo Beer (1995), a partir uma distância suficientemente longe da aplicação da carga, pode-se adotar para qualquer seção transversal, a tensão normal como sendo a tensão média  $\sigma = P/A$ . Com base nisso, é possível avaliar estruturas complexas com diversos componentes, apenas conhecendo-se as forças atuantes, mesmo que estas estejam longe das regiões críticas, e obter análises com bastante confiabilidade.

## 2.8 PRINCÍPIOS BÁSICOS DO MÉTODO DE ELEMENTOS FINITOS

O método de elementos finitos (MEF) é uma metodologia de construção de modelos numéricos utilizado para aproximar problemas de valores no contorno, e problemas de valor inicial e de contorno.

Para cálculos de elementos simples como vigas, por exemplo, é possível aplicar equações analíticas, baseados nas teorias de deformações e tensões, obtendo-se um valor exato. No entanto este método serve para alguns casos e foge da maioria das aplicações práticas que envolvam geometrias mais complexas.

Segundo Alves, (2007) é interessante desenvolver procedimentos aproximados, que podem ser aplicados em modelos gerais para diversas geometrias, porém, com uma aproximação dos resultados muito próximos da realidade. A técnica é subdividir os sistemas e seus componentes para se entender o comportamento em cada elemento para depois sim, analisar o conjunto como um todo.

Ainda de acordo com Alves, (2007), o método de elementos finitos consiste em abordar o equilíbrio de uma determinada estrutura da forma de um sistema discreto, dividindo-se a estrutura em partes separadas distintas, conectadas entre si por pontos. Criando assim um número finito de elementos simples modelando o sistema inteiro agregando estes elementos, onde os pontos de conexão são chamados de nós do modelo. Neste sistema discretizado, diferentemente do caso contínuo, em que se busca calcular o deslocamento dos

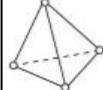
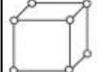
infinitos pontos, busca-se calcular somente o deslocamento de alguns pontos ou nós do modelo de forma que seja suficiente representar a deformação aproximada de todo o conjunto.

Este sistema de discretização, gera um grande conjunto de equações algébricas geradas pelo princípio de equilíbrio nos diversos pontos. Para isso é conveniente resolvê-las com o auxílio computacional que aborda estes cálculos de forma matricial.

### 2.8.1 Tipos de Elementos Finitos

Existem diversos modelos de elementos finitos que podem ser utilizados e também existem diversas maneiras de se modelar um componente utilizando-se diversos tipos de elementos, no entanto, nem todos os elementos podem ser utilizados por não representar os graus de liberdades adequados ao problema ou para simplificar o problema. Conhecer funcionamento de cada um, assim como, delimitar os graus de liberdade do elemento a ser utilizado, é de extrema importância para o sucesso do desenvolvimento da análise. Estes elementos podem ser no formato unidimensional, para avaliar esforços axiais em elementos simples como molas e barras de treliça, bidimensional, para elementos de cascas ou placas, e elementos tridimensional onde se pode modelar elementos tridimensionais mais complexos. Na Figura 6 é possível ver modelos de elementos mais comuns.

Figura 6 - Diferentes tipos de elementos finitos

Elemento	Nome
	Elemento linear 1D
	Elemento triangular 2D
	Elemento retangular 2D
	Elemento tetraédrico 3D
	Elemento hexaédrico 3D

Fonte: Adaptado de Kim ( 2011)

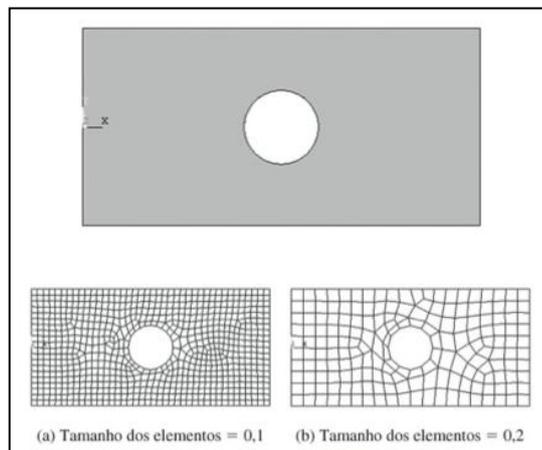
A escolha certa da aplicação destes elementos no modelo em que se deseja analisar é muito importante, pois a escolha equivocada do elemento pode distorcer os valores com a realidade, além de obter modelos de elementos finitos muito complexos que resultará em

inúmeras equações e dificultando o processamento da análise, além de aumentar consideravelmente o tempo da operação.

### 2.8.2 A Malha dos Elementos Finitos

A malha dos elementos finitos é uma aproximação da geometria original do modelo físico compostas por nós e elementos. Muitos programas comerciais de pré-processamento são capazes de gerar nós e elementos através de uma interface gráfica com o usuário de forma bastante simples, como se pode ver na Figura 7.

Figura 7 - Malha gerada em um elemento de placa com orifício central



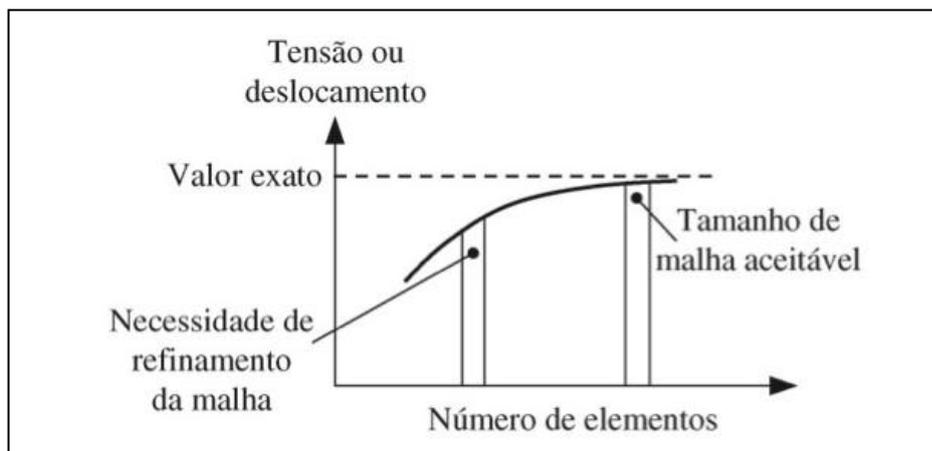
Fonte: Kim ( 2011)

Entretanto, a definição da malha influencia em diversos fatores para a análise. Uma malha muito refinada pode elevar consideravelmente o tempo pra se obter a solução, elevando os custos associados ao processo. Utilizam-se malhas refinadas quando se deseja avaliar pontos específicos de um componente ou estrutura, a fim de que seja possível uma melhor análise em pontos considerados importantes, por exemplo, em pontos com concentrações de tensões. Portanto, a escolha do tamanho da malha a ser utilizada deve ser de um tamanho suficientemente adequado para se obter uma solução dentro das tolerâncias estimadas, porém, sem comprometer a agilidade da análise.

Um dos métodos para definir se o tamanho da malha é adequado para uma determinada análise é o método do estudo de convergência. Segundo Kim (2011), este método é uma ferramenta importantíssima quando não se tem uma solução analítica disponível. Como em muitos casos em que não se tem uma solução exata, é muito difícil saber se a análise é

precisa mesmo se utilizando de inúmeros elementos. O método de convergência consiste em criar uma malha adicional, com o dobro do tamanho da malha analisada em pontos de concentração de tensão, se o resultado das duas malhas forem significativos, então um refinamento da malha original é necessária. Na Figura 8 é possível ver uma exemplificação do método.

Figura 8 - Convergência de resultados das análises de elementos finitos



Fonte: Kim (2011)

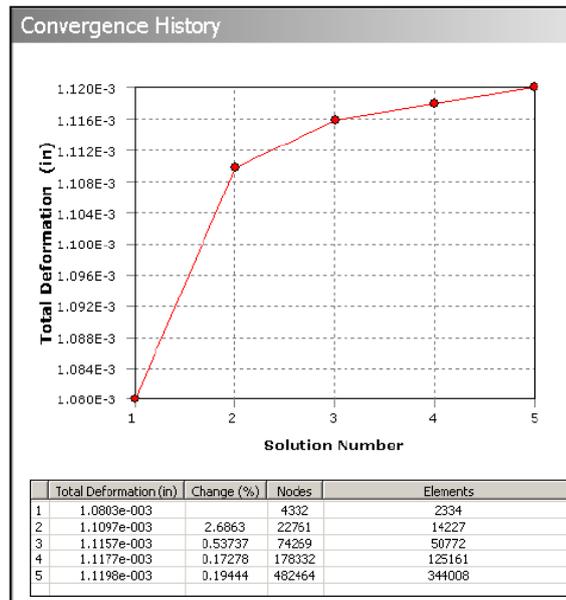
Existem muitos métodos para sofisticação, ou refinamento adaptativo de malhas em elementos finitos, conforme Sieniaki (2013), o modelo adaptividade hp é a versão mais sofisticada de refinamento de malhas. O método consiste em recortar os elementos de malha e a ordem do polinômio de aproximação é adaptado para aperfeiçoar o espaço de aproximação com relação a solução de equações diferenciais. A escolha dos elementos que devem ser refinados é feita de forma interativa com base no resultado de diminuição da estimativa de erro.

No software Ansys existe um padrão de malhas automáticas onde o usuário tem controle de ajuste onde é possível fazer uma breve configuração da malha mais fina ou mais grossa. Também é possível criar um malha com configurações mais sofisticadas, onde o usuário tem acesso a opções para manipular uma malha mais adequada para uma determinada análise.

No Ansys® também existem recursos de convergência da malha, onde é possível criar uma malha adequada e somente onde é necessário além de ser possível verificar a tendência de cada ciclo de convergência. Como é visto na Figura 9, o software gera um gráfico indicando a convergência de cada ciclo, informando a quantidade de elementos

gerados e os novos valores da análise, indicando a variação em porcentagem de cada ciclo. Este recurso determina e identifica regiões da malha onde apresentam erros estimados, estas regiões têm sua malha refinada e a nova malha é comparada com a malha anterior. Este procedimento é repetido conforme indicado pelo usuário e busca uma convergência dos resultados.

Figura 9 - Ciclo de convergência



Fonte: ANSYS (2010)

### 2.8.3 A Condição de Contato

Contatos são frequentes em análises de elementos finitos, principalmente em análise de montagens com diversos elementos posicionados muito próximos um do outro ou com mancais de articulação. Para estes casos é importante definir o tipo de contato entre cada elemento, de modo que a análise seja mais adequada com a estrutura física real.

Entretanto, é comum que elementos quando deformados na análise, tendem a interferir com outros elementos, como contato estático, contato dinâmico com geração de atrito, perda de energia pela geração de calor entre outros. Neste caso, dependendo do objetivo e do nível de precisão, as interferências terão influências significativas sobre a análise. Contudo, cuidados importantes devem ser tomados na fase pré-processamento de modo que estas interferências sejam consideradas.

Segundo Izi (2013), existem dois principais métodos, o Método de multiplicadores de Lagrange e o Método de Penalidade, para abordar as restrições de contato na área da

mecânica computacional de contato. O método de multiplicadores de Lagrange converge para um ponto ótimo de contato, mas é considerado um método complexo e sofisticado, já o Método de Penalidades é um método que possui maior simplicidade e, portanto maior facilidade de aplicação. Ambos os métodos citados possuem em comum a necessidade de uma linearização consistente para se obter uma convergência adequada.

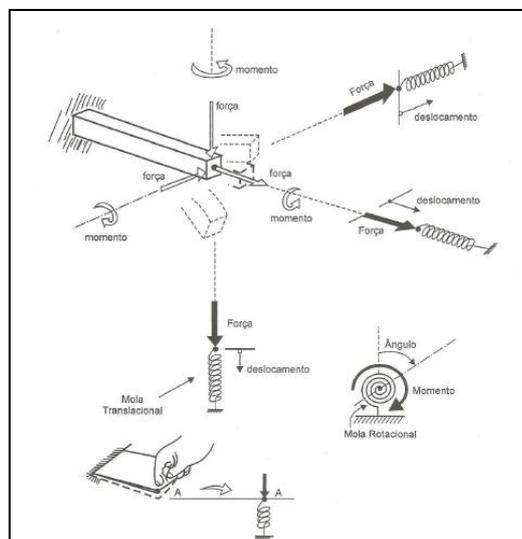
## 2.8.4 Modelo Unidimensional

Modelos unidimensionais são compostos por elementos que recebem estímulos de cargas em apenas uma direção, portanto, também apresentarão deslocamentos na mesma direção da carga. Estes elementos apresentam apenas um grau de liberdade e pode-se relacionar com elementos como a mola.

### 2.8.4.1 Elemento de mola e elemento de barra

O elemento de mola transmite apenas forças axiais e sofre deslocamentos axiais. Embora este conceito seja simples, ele dará uma visão generalizada para casos mais complexos. Segundo Alves (2007), este princípio monta uma base matemática que permite contabilizar a rigidez de todos os pontos de uma estrutura, em outras palavras, o modelo discretizado de uma estrutura é um “imenso mar de molas” que de ponto a ponto nodal contabiliza a rigidez da estrutura, como se pode ver na Figura 10.

Figura 10 - Diversos componentes de rigidez representados tal como uma mola



Fonte: Alves (2007)

Conforme Alves (2007), aplicando-se a ideia do diagrama de corpo livre a um elemento de mola isolado, pode-se adotar notações matriciais a seguir, onde a notação 10 representa forças nodais em uma matriz coluna  $2 \times 1$ , e a notação 11, os deslocamentos nodais em uma matriz coluna também  $2 \times 1$ .

$$\{f\}_{2 \times 1} = \begin{Bmatrix} f_1 \\ f_2 \end{Bmatrix} \quad (10)$$

$$\{u\}_{2 \times 1} = \begin{Bmatrix} u_1 \\ u_2 \end{Bmatrix} \quad (11)$$

Ainda segundo Alves (2007), é possível relacionar todas as forças e os deslocamentos em um elemento finito pela Matriz Rigidez do Elemento  $[k]^e$  conforme representado na equação 12, onde seu resultado tem uma dimensão  $2 \times 1$ . Também é importante salientar que os coeficientes  $k$  representam forças associadas a um deslocamento unitário submetido em um nó e mantendo o outro nó fixo. Assim, os termos da matriz representam relações de causa e efeitos, onde a causa é o deslocamento unitário em um nó e os efeitos são as forças provocadas nos nós devido a esse deslocamento.

$$\{f\}_{2 \times 1} = [K]_{2 \times 2}^e \cdot \{u\}_{2 \times 1} \quad (12)$$

Levando em conta as considerações anteriores e as propriedades de álgebra matricial, pode-se perceber que como os elementos de mola têm apenas duas componentes de deslocamentos possíveis, sua matriz rigidez terá dimensão  $2 \times 2$ , portanto um elemento finito qualquer com  $n$  componentes de deslocamentos possíveis terá uma matriz rigidez da forma de uma matriz quadrada de ordem  $n$ .

Segundo Alves (2007), como os termos da matriz rigidez representam as forças e deslocamentos unitários, ao conhecer a matriz de rigidez do elemento, a relação de força e deslocamento unitários já estão definidas para o elemento inteiro. Com isso também é possível saber a força atuante em cada nó devido aos efeitos de deslocamentos superpostos dentro dos parâmetros lineares do elemento, podendo assim, a ideia do elemento mola ser associada para diversos elementos finitos, não se limitando a elementos como molas, barras de treliça e vigas.

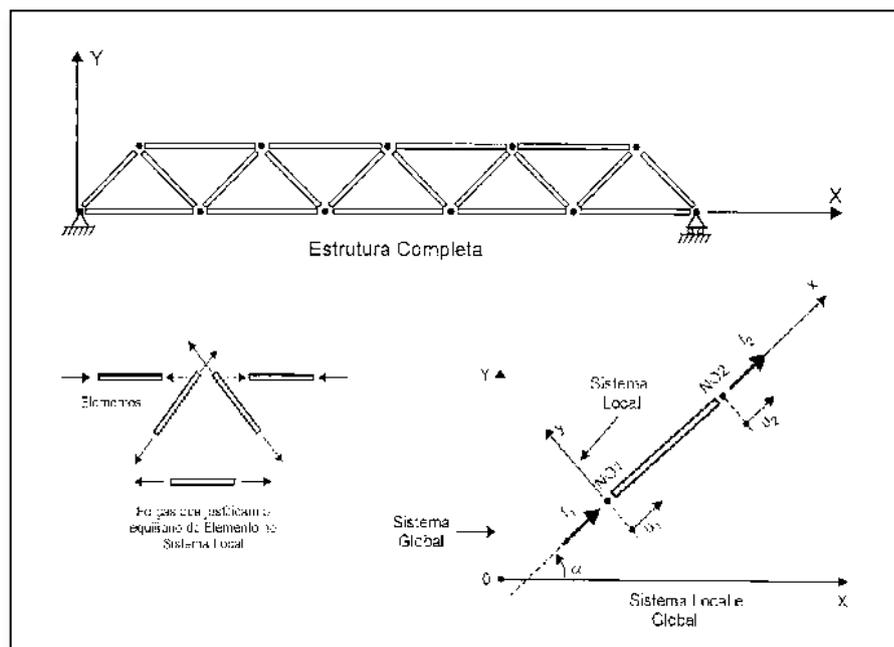
### 2.8.5 Elemento Bidimensional

Conforme Alves (2007), os modelos mais simples, como molas, treliças e barras, permitem a aplicação do método direto para se determinar a matriz de rigidez considerando as teorias da resistência dos materiais elementar. Contudo, era possível determinar os deslocamentos dentro do elemento a partir dos deslocamentos nodais de forma precisa, pois os deslocamentos eram em apenas um grau de liberdade enquanto os outros estavam limitados. No elemento bidimensional a determinação da matriz rigidez do elemento é inviável no método direto e será feito de forma aproximada e utilizara conceitos como técnicas matemática de interpolação, trabalho realizado por uma força, energia de deformação e transformação de energia.

### 2.8.6 Elemento de Barra Bidimensional

Da mesma forma que um elemento de mola, as barras de uma treliça, também se comportam como elementos de mola. Como as barras são unidas por juntas articuladas, e que se pode associar aos nós, as forças são distribuídas entre as barras por essas articulações, de modo que nas barras somente forças axiais estejam agindo, conforme Figura 11.

Figura 11 - Representação do equilíbrio dos elementos de uma treliça

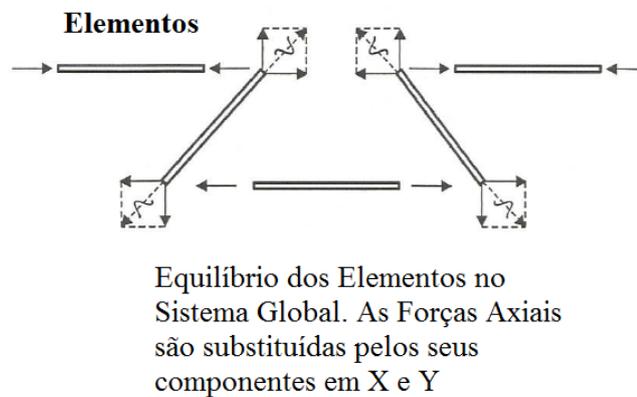


Fonte: Alves (2007)

Entretanto, elementos de barras que formam uma treliça, seja ela uma treliça plana ou espacial, estão posicionados em ângulos arbitrários em relação ao sistema de coordenadas definido ao conjunto, de modo que as forças que atuam nos nós não estão na direção longitudinal de seu eixo, como se pode ver na Figura 11. Com isso, não se pode utilizar o procedimento anterior que envolve o somatório de forças associadas ao deslocamento unitário.

Conforme Alves (2007), para determinar a rigidez da estrutura completa, deve-se conhecer a rigidez de cada elemento, para tanto, as forças e os deslocamentos associados a cada barra individual deve ser relacionados em um sistema de referência comum, conforme ilustrado na Figura 11. Para isso, pode-se representar o equilíbrio dos elementos decompondo as forças nos eixos  $x$  e  $y$  como demonstrado na Figura 12. Com isso, as componentes nesses eixos podem ser superpostos algebricamente. Como um problema escalar, as forças decompostas em  $x$  e  $y$  poderão de relacionar respectivamente com as forças  $x$  e  $y$  dos outros elementos.

Figura 12 - Decomposição das forças nos eixos X e Y



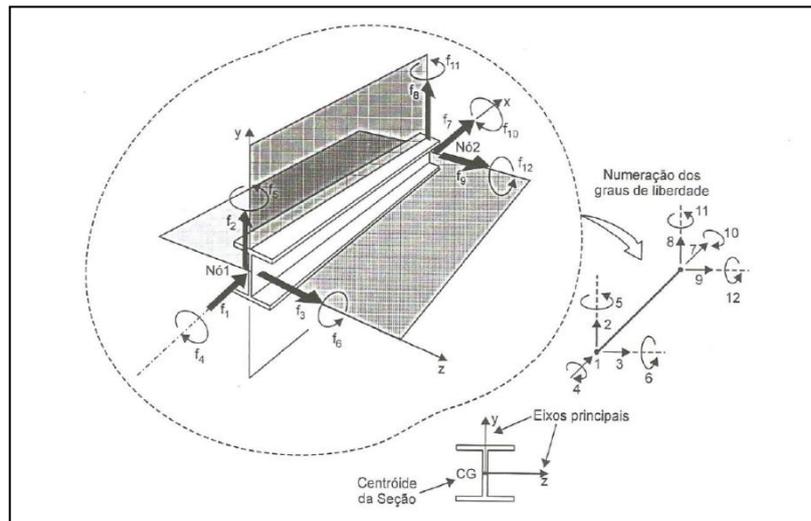
Fonte: Alves (2007)

Segundo Alves (2007), contudo, a matriz de rigidez de um elemento deve ser definida em um sistema local, onde representa as forças e deslocamentos do elemento, em seguida a representação do equilíbrio do elemento de ser transformada para o sistema global, ou seja, que as forças sejam transformadas de um sistema para outro.

### 2.8.7 Elemento de viga

Conforme Alves (2007), vigas são elementos que apresentam comprimento muito maior que as dimensões de sua seção transversal, e que além de transmitir forças axiais, momentos fletores, forças cortantes e momentos torçores, conforme ilustrado na Figura 13.

Figura 13 - Elemento viga com suas diversas transmissões de forças



Fonte: Adaptado de Alves (2007)

Ainda segundo Alves (2007), a lei das seções planas constitui a base da teoria elementar da flexão de vigas, estabelecendo que a seção transversal de uma viga permaneça plana após a deformação. As vigas são conectadas umas nas outras formando uma estrutura reticulada, e que, ao contrário das treliças a união entre estes elementos são rígidas, dando origem a estruturas amplamente utilizadas nas construções mecânicas.

As forças externas que atuam nestas estruturas podem ser aplicadas nas juntas ou nos nós, como também podem ser aplicadas entre os nós. Estas forças aplicadas no interior do membro podem ser substituídas por cargas nos nós de forma estaticamente equivalente.

Conforme Alves (2007) para se determinar a configuração deformada da estrutura inteira através dos deslocamentos nodais, deve-se conhecer a rigidez da estrutura toda, que deve contabilizar a rigidez de cada elemento. A matriz de rigidez para elementos de viga será formada por 12 graus de liberdade, conforme é visto na Figura 13, gerando assim uma matriz  $12 \times 12$ . Também é importante definir os eixos locais de referência que deverão ser os eixos centrais principais e o eixo dos centroides. Vale ressaltar que as forças de flexão, tração e axiais serão tratadas de forma independentes.

### **2.8.8 Elemento de Placa**

A placa é um sólido plano que apresenta uma espessura muito menor em relação a sua largura. Segundo Alves (2007), as chapas podem estar sujeitas a cargas perpendiculares ao seu plano, resultando em um deslocamento no mesmo sentido da carga pelo comportamento da flexão. Este comportamento é chamado de Comportamento de placa. Por outro lado, as chapas podem estar apenas sujeitas a forças agindo paralelamente ao seu plano, causando deslocamentos que estão no seu próprio plano caracterizando o Estado Plano de Tensões.

Ainda conforme Alves (2007) pode-se fazer uma analogia com o comportamento de vigas. Considerando a chapa constituída por inúmeras tiras com larguras idênticas a sua espessura, estas tiras podem ser calculadas com o procedimento semelhante com o das teorias das vigas. A seção transversal dessas tiras se mantém plana durante a flexão, apenas apresentando rotação em relação ao eixo neutro da tira.

### **2.8.9 Elemento de Casca**

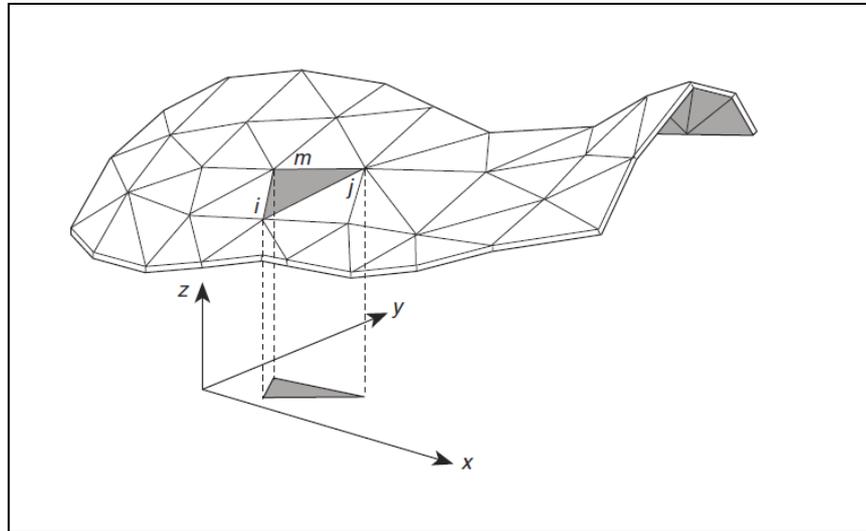
Segundo Alves (2007) o Elemento de Casca mais simples pode ser formulado partindo-se da ideia de superposição de comportamentos físicos independentes em um mesmo elemento, semelhante ao elemento de viga com um comportamento linear. As forças agindo no plano médio da chapa só dependem de seus respectivos deslocamento, as ações de flexão da chapa não interferem as ações axiais. As cargas laterais e as cargas atuando no plano médio podem agir simultaneamente sem que uma interfira na outra, pois suas ações são independentes.

Assim, ainda conforme Alves (2007), um Elemento Plano de Casca pode ser obtido pela superposição do comportamento de flexão da placa e do comportamento de estado plano de tensões, uma vez que os comportamentos são independentes. Estes comportamentos fazem com que a utilização de elementos de casca seja adequada para diversas análises detalhadas como o de estruturas metálicas de chapa e outras inúmeras situações.

Entretanto, segundo Zienkiewicz (2000), a casca é, em essência, uma estrutura que pode ser derivada a partir de uma placa, formada por superfícies curvas individuais e com os mesmos pressupostos utilizados em placas em relação à distribuição transversal de deformação de tensões. O comportamento de uma superfície pode ser adequadamente representado pelo comportamento de uma superfície subdividida por inúmeros elementos, que estes, quanto menores forem, melhores são os resultados das convergências. Na Figura 14 é

possível observar um exemplo de uma geometria arbitrária modelada com elementos finitos triangulares de casca.

Figura 14 - Geometria arbitrária modelada com elementos triangulares de casca



Fonte: Adaptado de Zienkiewicz (2000)

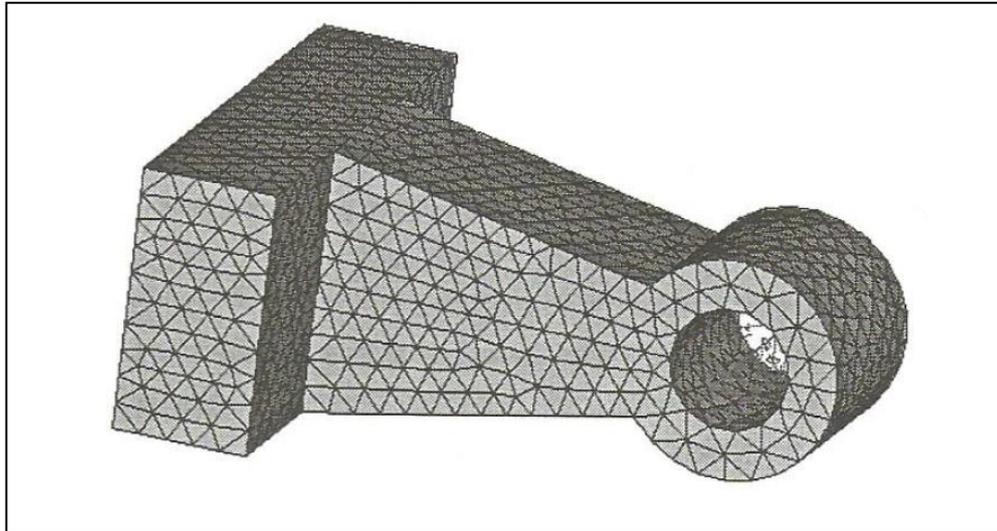
Ainda conforme Zienkiewicz (2000), em uma casca o elemento está geralmente sujeito tanto à flexão quanto a torção, e na divisão da malha podem ser utilizados elementos triangulares. Os elementos de cascas cilíndricas são muito bem representados por elementos quadriláteros retangulares. Os acoplamentos de elementos de cascas, por efeitos da membrana, representam mais eficientemente as tensões e flexões dos que aqueles em que o acoplamento ocorre apenas nos limites entre os elementos. Portanto, para muitos propósitos práticos, os contatos destes elementos planos permitem respostas mais adequadas e também uma maior facilidade de acoplamento de outros elementos como vigas.

### 2.8.10 Elemento Sólido

Conforme Alves (2007), o corpo sólido contínuo pode ser subdividido com elementos finitos conectados em seu nós, e devido à versatilidade de sua geometria pode ser representado por Elementos Sólidos Tetraédricos. O Elemento Sólido Tetraédrico possui quatro nós, que sob um estado de tensões triaxiais, apresenta deslocamentos nos nós nas três componentes de deslocamentos, conforme a teoria da elasticidade. Como o Elemento Sólido tetraédrico apresenta quatro nós, o elemento terá 12 graus de liberdade, desta forma sua matriz das forças nodais terá dimensões 12x12 assim como a matriz dos deslocamentos que

também terá dimensões  $12 \times 1$ . Como consequência, a matriz rigidez apresentará dimensões  $12 \times 12$ . Um exemplo de um componente modelado com elementos sólidos tetraédricos é apresentado na Figura 15.

Figura 15 - Componente modelado com elementos sólidos tetraédricos



Fonte: Adaptado de Alves (2007)

## 2.9 ANÁLISE LOCAL-GLOBAL

A resolução de análises estruturais com a utilização das ferramentas de elementos finitos tem ganhando grande espaço na indústria. A confiabilidade do método e principalmente o tempo muito reduzido para a análise e a redução dos custos, tem feito deste uma ferramenta de destaque para projetos. Segundo Grison (2005), embora o MEF seja uma ferramenta de considerável importância para análises de estruturas e com todos os avanços tecnológicos dos processadores digitais, a discretização dos problemas deve ser tratada com cuidado. A grande complexidade das estruturas reais, a diversidade de cargas associadas, torna inviável uma análise detalhada da estrutura em geral. Conforme, Alves (2012 apud NOOR, 1986), problemas com características de regiões que apresentem singularidades, envolvem o uso de malhas suficientemente refinadas no MEF, acabando por dificultar a modelagem e a descrição das tensões. Estas malhas refinadas aumentam a complexidade da modelagem e o tempo para o processamento dos dados e resoluções computacionais.

A técnica Global-Local consiste, inicialmente, conforme Alves (2012), na solução de um problema denominado “problema global”, para o qual é usada em todo o seu domínio uma discriminação grosseira. Em seguida, define-se um problema, comumente denominado

“problema local”, utilizando como condições de contorno a solução do problema global. Esta última análise é realizada refinando-se bastante a malha para se encontrar uma solução mais precisa.

Conforme Arndt (2010), este método de análise apresenta vantagem como possibilidade de refinamento do espaço global para o comportamento local, obtenção da função de forma mais eficiente que no refinamento do método de elementos finitos e facilidade na implementação de refinamentos locais. Entretanto, este método requer cuidados na escolha adequada do espaço de funções de aproximação local e condições de contorno apropriadas.

## 2.10 DADOS DA NORMA NBR 14768 (2012) PARA APLICAÇÃO DO MODELO.

### 2.10.1 Fatores Dinâmicos

A norma NBR 14768 considera efeitos dinâmicos devido às vibrações da estrutura quando a carga que está sendo elevada ou abaixada. Estes efeitos devem ser considerados e utilizados para o projeto da estrutura do guindaste, aplicando-se o fator  $\Phi_1$  devido a estas forças de inércias que atuam sobre as massas do guindaste. O valor de  $\Phi_1$  deve ser o menor dos dois valores, entre 1,1 e  $\Phi_2$ , e pode ser expresso pela equação 13. Entretanto, o valor de  $\Phi_1$  não deve exceder o valor de  $\Phi_2$  caso este seja inferior a 1,1.

$$\Phi_1 = \text{mín.}(1,1; \Phi_2) \quad (13)$$

Para o caso de elevar ou baixar uma carga, bem como o início do movimento, ou parada de um movimento vertical, os efeitos vibracionais devem ser incluídos no carregamento multiplicando a massa içada pelo fator  $\Phi_2$ , este fator deve ser tomado como apresentado na equação 14, como segue:

$$\Phi_2 = \Phi_{2,\text{mín.}} + \beta_2 \cdot V_h \quad (14)$$

Os valores de  $\Phi_{2,\text{mín.}}$  e  $\beta_2$  são apresentados na Tabela 1 conforme a classificação de elevação de acordo com as características dinâmicas e elásticas do guindaste hidráulico articulado. Para guindastes montados sobre veículos, a norma NBR 14768 (2012) recomenda a classificação HC1, que diz respeito a este tipo de montagem.

Tabela 1 - Valores de  $\Phi_{2,min}$  e  $\beta_2$ 

Classe de Içamento	$\beta_2$	$\Phi_{2,min}$
HC1	0,17	1,05
HC2	0,34	1,10

Fonte: Adaptado de NBR 14768 (2012)

A velocidade vertical constante da massa a ser içada é expressa como  $V_h$  e os valores são apresentados na Tabela 2.

Tabela 2 - Valores de  $V_h$ 

Combinações de Carga	Tipo de movimento do guindaste e método de operação		
	HD1	HD4	HD5
A1, B1	$V_{h,máx.}$	$0,5 \times V_{h,máx.}$	$V_h = 0$
C1	—	$V_h, máx.$	$0,5 \times V_h, máx.$

Fonte: Adaptado de NBR 14768 (2012)

Neste caso, em específico, será utilizada a classificação HD1, que pela norma classifica os guindastes que operam com velocidades constantes, o que representa o içamento dos guindastes TKA modelo 23.700. A classificação HD1 representa guindastes onde o início do içamento é feita com velocidades continuamente crescentes e HD5 que apresentam algum tipo de controle de velocidade automático onde assegura que a influência da velocidade seja desprezada sobre as forças dinâmicas.

A termo  $V_{h,máx.}$  é a velocidade vertical máxima do gancho, que nas combinações de carga A1 e B1, é dada por qualquer acionamento simples do sistema hidráulico. Nas combinações de carga C1, a velocidade máxima vertical é dada por todas as articulações hidráulicas atuando simultaneamente.

### 2.10.2 Combinações de Cargas

A norma ABNT 14768 (2012) classifica as combinações de cargas conforme as condições de trabalho, típicos para cada equipamento. As combinações de carga A1 e B1 são utilizadas para classificar guindastes que apresentam condições normais de serviço com elevação e abaixamento de cargas com picos dinâmicos em qualquer função hidráulica, porém A1 é utilizada sem considerar os efeitos do vento, ao contrário de B1 que considera os efeitos

do vento. Neste trabalho serão considerados fatores da carga A1, que representam bem as condições de trabalho do guindaste modelo 23.700. As combinações de cargas e seus respectivos fatores para considerações nos cálculos são apresentados na Tabela 3.

Tabela 3 - Combinações de Cargas

Categoria de cargas	Cargas		Combinações de cargas A		Combinações de cargas B		Combinações de cargas C	
			A1	A2	B1	B2	C1	C3
Regular	Gravidade, aceleração das unidades de elevação	Massa do guindaste deslocada	$\Phi 1$	$\Phi 1$	$\Phi 1$	$\Phi 1$	$\Phi 1$	1,0
		Massa da carga bruta	$\Phi 2$	$\Phi 3$	$\Phi 2$	$\Phi 3$	–	–
	Aceleração das unidades de giro	Massa da carga bruta	$\Phi 5h$	$\Phi 5h$	$\Phi 5h$	$\Phi 5h$	–	–
Ocasional	Efeitos climáticos	Carga do vento em serviço	–	–	1	1	–	–
Excepcional	Forças devido a um efeito excepcional		–	–		–	$\Phi 2$	1,0

Fonte: Adaptado de NBR 14768 (2012)

Combinações de carga A2 e B2 são utilizadas para guindastes em condições normais de serviço que apresenta garras, imãs ou acessório similar que permita a liberação repentina da carga bruta na operação, onde A2 é a condição sem efeito do vento e B2 com efeito do vento. As combinações de carga C1 consideram picos dinâmicos simultâneos que são causados por elevar ou baixar cargas na soma das velocidades verticais máximas de todos os pontos de articulação. Para guindastes sob condições de ensaio, quando o protótipo é carregado com massas específicas com o objetivo de validar o equipamento, são utilizadas combinações de carga definido como C3.

Estas combinações de carga devem ser consideradas no cálculo estrutural, assim como os fatores de carga parcial  $Y_p$ , pois garantem que a estrutura não venha a falhar pelo escoamento do material ou por instabilidade elástica, que podem ser ocasionadas por valores extremos de carga.

### 3 DESENVOLVIMENTO DOS MÉTODOS

#### 3.1 INTRODUÇÃO

Neste capítulo é apresentada uma descrição do produto guindaste articulado hidráulico onde se pretende ilustrar brevemente as condições de contorno envolvidas no equipamento e as considerações recomendadas pela norma NBR 14768 (2012). Com base nos conceitos apresentados no capítulo anterior, é descrita uma proposta análise via método de elementos finitos com a utilização do software Ansys versão 13.0 e, por conseguinte, uma comparação dos dados obtidos com as tensões admissíveis sugeridas pela norma ABNT NBR 14768 (2012).

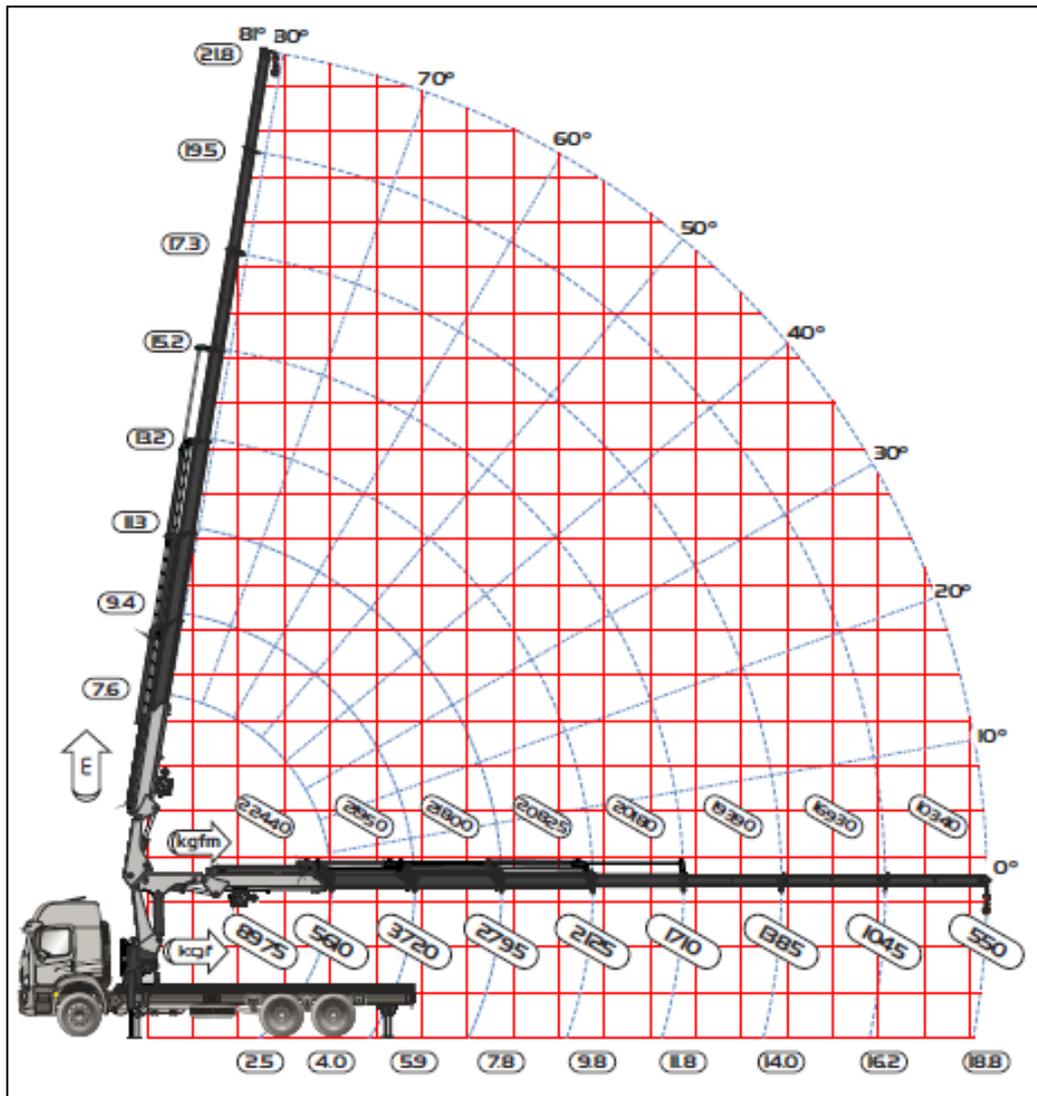
#### 3.2 DESCRIÇÃO DO PRODUTO GUINDASTE ARTICULADO HIDRÁULICO

O guindaste articulado hidráulico é definido segundo NBR 14768 (2012), como um mecanismo operacional que compreende uma coluna que gira sobre uma base e um sistema de lanças, estas, acopladas na parte superior da coluna. O guindaste normalmente é instalado em um veículo, mas também pode ser instalado em reboque e semirreboque, com a finalidade de carga e descarga do próprio veículo ou para outras tarefas de elevação e manuseios de cargas. A TKA especifica as capacidades máximas de cargas para cada alcance, conforme configurações de lanças, através de um gráfico conforme é visto na Figura 16.

Na Figura 16 também é possível observar um equipamento TKA modelo 23.700 instalado sobre um veículo. Este equipamento foi projetado para uma capacidade de içamento de carga que gera um momento máximo de 23 toneladas/metro e possui uma configuração com quatro lanças de acionamento hidráulicas e mais três lanças com acionamento manuais. Esta configuração permite que o equipamento tenha um alcance na horizontal de 18,8 metros e permite elevar a carga até uma altura de 21,8 metros.

Os guindastes hidráulicos articulados fabricados pela TKA utilizam chapas de aço de baixa liga e alta resistência, conhecidos como BLAR. São materiais fornecidos pela empresa SSAB, um dos principais fornecedores mundiais de chapas de alta resistência, sob a marca comercial DOMEX. O equipamento em questão, TKA modelo 23.700, é fabricado com chapas aço com limite de escoamento de 600 MPa, conforme pode-se analisar juntamente com as propriedades mecânicas do material na Tabela 4.

Figura 16 - Gráfico de carga do equipamento TKA 23.700



Fonte: Adaptado de TKA Guindastes (2014)

Tabela 4 - Propriedades mecânicas do Domex 600

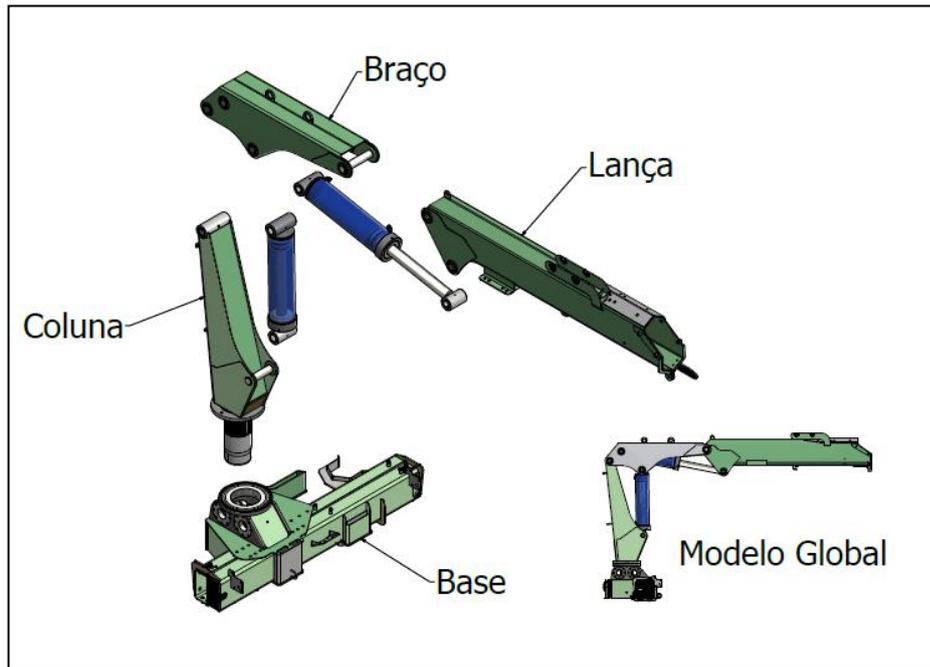
Tensão de Escoamento ( $S_e$ ) min	Limite de Resistência a Tração ( $S_{ut}$ ) min - máx	Alongamento Pós-ruptura $\geq 3$ mm $A_5$ % min
600 (MPa)	650 - 820 (MPa)	16

Fonte: Adaptado de [www.ssab.com.br](http://www.ssab.com.br) (2014)

Neste trabalho serão considerados os principais componentes do guindaste, como: coluna, braço e capa da lança; estes componentes podem ser vistos na Figura 17, em uma vista explodida do modelo. Estes componentes são considerados importantes, pois,

independente da configuração das lanças ou do alcance de operação, o momento gerado pelas cargas, incluindo o peso da própria lança, deverá ser suportado por estas estruturas, além das forças das ações dos cilindros hidráulicos. Como comentado anteriormente, todas as chapas destes componentes são do material DOMEX 600.

Figura 17 - Vista explodida dos principais componentes e modelo global do guindaste



Fonte: Autor (2014)

### 3.3 ETAPAS

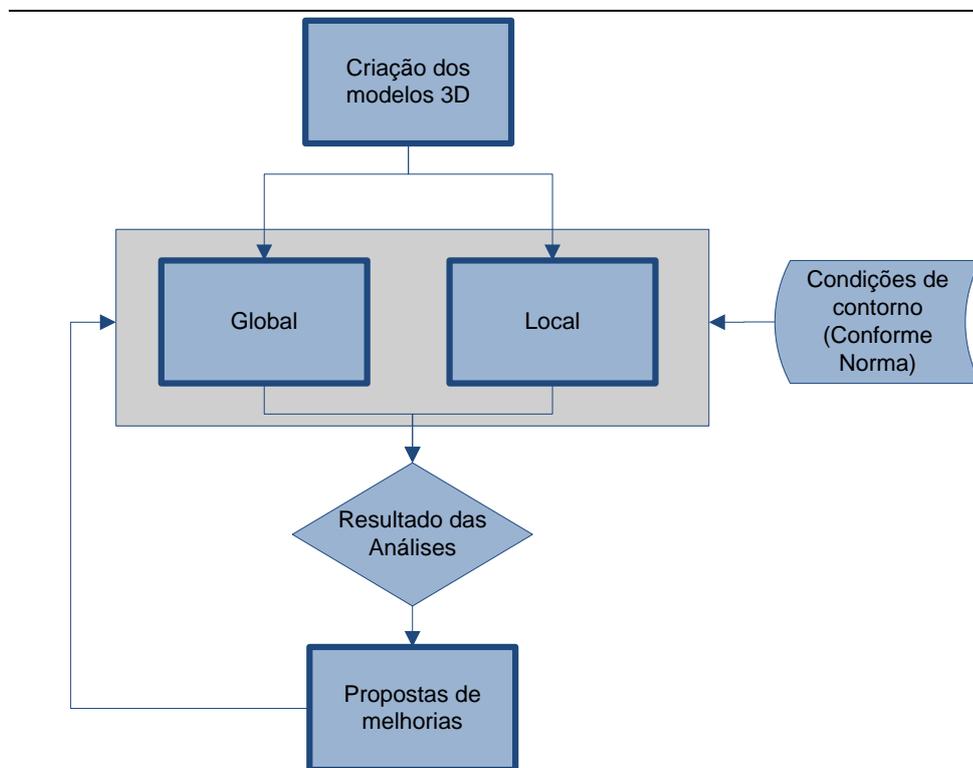
#### 3.3.1 Modelagem computacional do guindaste com seus principais componentes

Os componentes do guindaste, torre, braço e capa da lança, serão modelados com software CAD comercial, representando globalmente os principais componentes do equipamento. Com o intuito de serem analisados localmente, os componentes serão modelados separadamente, respeitando-se os processos de fabricação e as propriedades dos materiais empregados. Estas peças serão unidas na montagem dos componentes, representando assim, os conjuntos soldados. Também serão atribuídas propriedades do material utilizado na fabricação, o DOMEX 600.

### 3.3.2 Criação do modelo de elementos finitos

O desenvolvimento da análise pelo método de elementos finitos será dividido nas etapas conforme fluxograma apresentado na Figura 18. A criação de um modelo tridimensional global do equipamento, pré-processamento, processamento e pós-processamento do modelo. Em seguida, este processo será repetido para o modelo tridimensional local da montagem da capa da lança com a primeira lança hidráulica. Os dados obtidos das análises devem ser confrontados com os valores de tensões sugeridos pela norma NBR 14768 (2012), conforme definições estabelecidas.

Figura 18 - Fluxograma para o Modelo de Elementos Finitos



Fonte: Autor (2014)

Primeiramente, foi analisado um modelo completo, contemplando os principais componentes do guindaste, onde se obtiveram as reações das tensões e deslocamentos do modelo. O modelo global teve sua malha gerada a partir dos conceitos de cascas, isto tem por finalidade reduzir o tempo de processamento do MEF.

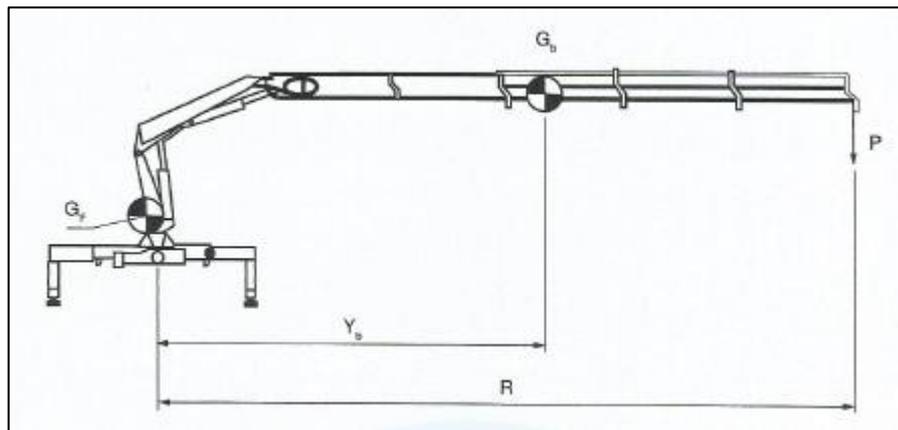
Em seguida foi analisado o Modelo Local com a finalidade de se analisar as tensões dos contatos entre a Capa da Lança e a primeira lança hidráulica. Para o Modelo Local foram

utilizados elementos tetraédricos com um refinamento nas regiões de elevado gradiente de tensão. Também para este modelo sfoi utilizado a ferramenta de convergência de malha.

Após as análises, foi gerado um modelo contemplando as sugestões de melhorias do equipamento. Em sequência, uma nova análise foi gerada a partir do modelo com as melhorias sugeridas.

O pré-processamento do modelo global consiste em representar com um modelo de elementos finitos, um guindaste fixado na base, e em suas articulações, aplicando-se uma carga na ponta da lança, posição  $P$ , de acordo com o alcance  $R$  da lança, conforme Figura 19. O valor da carga é definido pelo gráfico de carga do equipamento TKA modelo 23.700, apresentado na Figura 16, mais as considerações dos fatores dinâmicos descritas na norma NBR 14768. Ainda na Figura 19,  $G_b$  representa a massa dos componentes e  $Y_b$  sua posição em relação a torre do guindaste.

Figura 19 - Demonstração das Forças Envolvidas



Fonte: NBR 14768 (2012)

Para o modelo de elementos finitos, foram utilizadas combinações de elementos sólidos e de casca na discretização dos componentes.

### 3.3.3 Verificação da segurança dos modelos com relação à análise estrutural

A norma NBR 14768 (2014) define quais são as tensões admissíveis para aços estruturais não-ligados de acordo com as combinações de carga que o equipamento está sujeito nas condições de trabalho. Na Tabela 5 estão apresentados os fatores de segurança para diferentes combinações de carregamentos.

Tabela 5 - Fator de segurança admissíveis para aços estruturais não-ligados

Combinação de Carga	A	B	C
Fator de segurança (S)	1,5	1,33	1,25

Fonte: Adaptado de NBR 14768 (2012)

O fator de segurança  $S$ , apresentado na Tabela 5, deve ser aplicado para determinar as tensões máximas admissíveis que a estrutura pode ser submetida conforme equação 6, apresentada no capítulo 2. Esta equação pode ser reescrita, podendo assim, definir a tensão máxima admissível ( $\sigma_{adm}$ ) para a estrutura, conforme norma EN 10025 (1990), em função da tensão de escoamento  $S_e$  e do fator de segurança  $S$ . Reformulando a equação e substituindo a tensão do limite de resistência pela tensão de escoamento do material, obtém-se a equação 15.

$$\sigma_{adm} = \frac{S_e}{S} \quad (15)$$

A norma NBR 14768 (2014) seção B.2.4, define que, para outros tipos de aços que não estão citadas na norma, a tensão de escoamento seja determinada a partir da tensão do limite de resistência a tração. Para aços com limite mínimo de resistência a tração acima de 590 MPa pode-se ter limites de escoamento  $S'_e$  definidos na equação 16. Esta equação é válida somente se o produto da tensão de resistência mínima com o alongamento pós-ruptura, considerando 5 vezes a seção transversal original em porcentagem, for maior ou igual ao fator 9800. Conforme Tabela 1, das propriedades do material Domex 600, em que a tensão de resistência mínima é 650 MPa e alongamento mínimo de 16%, tem-se, então, o valor da multiplicação igual ao fator 10400, o que torna a condição válida, e a equação 16 pode ser aplicada.

$$S'_e = 0,8 \cdot S_{ut} \quad (16)$$

Considerando os valores das propriedades do material em questão, onde o limite mínimo de resistência a tração é 650 MPa, tem-se um limite de escoamento de 520 MPa. Considerações de carga A, utilizadas para definir as condições do equipamento a ser analisado e conjuntamente a equação 15, tem-se uma tensão admissível de 346 MPa. Esta tensão admissível não deve ser ultrapassada para que o equipamento tenha uma sua integridade estrutural garantida em suas operações. O critério de falha a ser adotado na análise será da teoria da máxima energia de distorção de von Mises.

### **3.3.4 Propostas de melhoria no produto tendo como base os resultados da análise**

Após a obtenção dos resultados da análise, e os mesmos terem sido confrontados com os valores estimados de tensões admissíveis, foram propostas melhorias nos componentes analisados. Estas melhorias envolvem alterações de espessuras e geometria dos componentes, de forma a aumentar a integridade estrutural do guindaste.

## 4 ANÁLISE NUMÉRICA DO GUINDASTE TKA 23.700

Com o intuito da verificação do equipamento TKA 23.700 por meio do método de elementos finitos, o guindaste foi modelado computacionalmente, em 3D, com o auxílio do software Autodesk Inventor versão 2013. Neste modelo, foram considerados todos os componentes estruturais, de forma a se obter um modelo mais próximo possível da realidade. Deste modo, foi possível simular os efeitos que a distribuição das tensões causada em seus componentes no momento em que os mesmos são solicitados no içamento de cargas.

O modelo construído apresenta os principais componentes do guindaste, conforme apresentado nos capítulos anteriores. Para o modelo global foram modelados: a torre, o braço e a capa da lança. Foi desenvolvido também um modelo local, este tem por objetivo analisar as tensões atuantes na boca da capa da lança quando a primeira lança hidráulica estiver totalmente estendida. Neste caso, foi possível a análise da transferência do momento da carga içada, além dos próprios pesos das demais lanças que fazem parte deste equipamento.

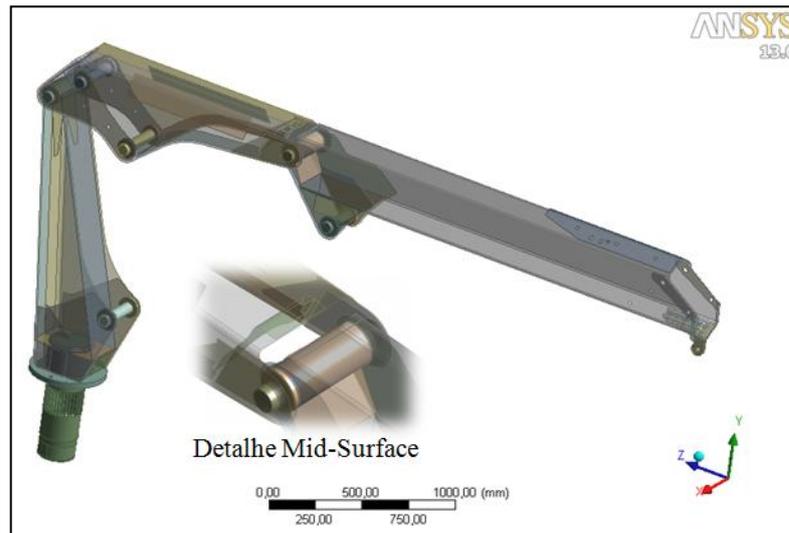
Após a modelagem dos componentes, os mesmos foram unidos em montagens para posteriormente serem importadas no software de elementos finitos.

### 4.1 CRIAÇÃO DOS MODELOS DE ELEMENTOS FINITOS

Os modelos criados em 3D foram importados para o software Ansys, onde foram realizadas as análises de elementos finitos.

O modelo global, importado do software Inventor, passou por uma remodelagem no módulo do Ansys chamado *Design Modeler*. Esta remodelagem permite que todas as superfícies dos componentes fabricados por chapas metálicas, modeladas como sólidos, sejam transformados em uma única superfície, isto possibilita posteriormente que o software gere malhas com elementos de casca. Para tanto foi utilizada a ferramenta *Mid-Surface*, onde foi abstraída uma única superfície intermediária dos corpos em todos os componentes, conforme é possível verificar na Figura 20. Com este recurso, o gerador de malhas cria os elementos de casca com base nesta nova superfície gerada.

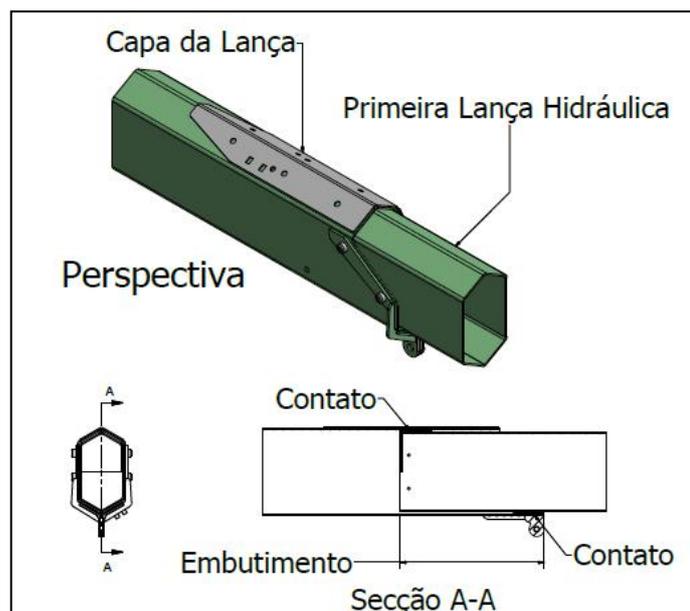
Figura 20 - Guindaste modelado em casca



Fonte: Autor (2014)

Para o Modelo Local, foram modelados os componentes da Capa da Lança e a primeira lança hidráulica. Com este modelo, pretende-se simular as transferências das forças da Primeira Lança para a Capa da Lança, para que assim, seja possível avaliar as tensões envolvidas nos contatos entre os dois componentes. Para tanto, foram modelados a montagem de ambos e considerado as regiões de contato e um pequeno comprimento dos componentes próximos aos contatos. Este modelo pode ser visto conforme ilustrado na Figura 21.

Figura 21 - Modelo Local



Fonte: Autor (2014)

## 4.2 OBTENÇÃO DOS DADOS PARA AS CONDIÇÕES DE CONTORNO

A definição dos valores das cargas para a aplicação nas condições de contorno no modelo de elementos finitos seguiram as orientações da norma NBR 14768 (2012), conforme apresentado no capítulo 3. De acordo com o que foi apresentado anteriormente, as cargas máximas permitidas pelo gráfico de carga do equipamento, Figura 16 do capítulo 3, deve ser multiplicadas pelo fator  $\Phi_2$  para que sejam considerados os efeitos dinâmicas devido às vibrações da estrutura quando a carga está em movimentação. Da mesma forma, as massas do guindaste devem ser multiplicadas pelo fator  $\Phi_1$  para que sejam considerados os efeitos dinâmicos causados pelas massas da estrutura. O fator  $\Phi_1$  foi apresentado no capítulo 2 na equação 12.

Os valores de  $\Phi_2$  são obtidos a partir da equação 13, apresentada no capítulo 2, onde são levados em consideração os efeitos das velocidades verticais atuando no gancho que sustenta a carga. Estas velocidades são calculadas pela decomposição da velocidade do atuador hidráulico. Para se definir a velocidade do atuador hidráulico deve-se levar em consideração a vazão do circuito hidráulico e o diâmetro interno do cilindro de elevação, apresentados na tabela 6.

Tabela 6 - Propriedades do Equipamento

TKA 23.700		
Vazão do Circuito	$1,17 \times 10^{-3}$	m <sup>3</sup> /s
Área do êmbolo	$2,66 \times 10^{-2}$	m <sup>2</sup>

Fonte: Autor (2014)

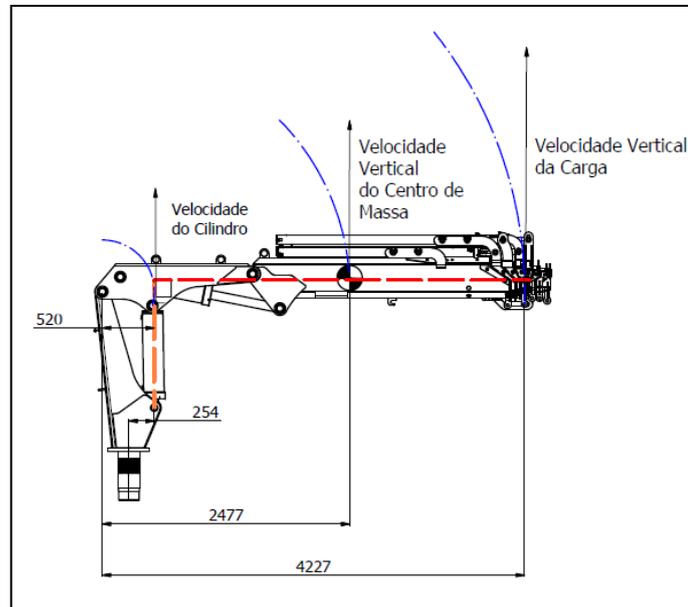
Com o conhecimento da vazão do sistema e da área do embolo do pistão, a equação 17 é empregada para o cálculo da velocidade do atuador hidráulico, onde  $v_c$  é a velocidade do atuador em m/s,  $V$  é a vazão do sistema em m<sup>3</sup>/s e  $A$  é a área do embolo da camisa em m<sup>2</sup>.

$$v_c = \frac{V}{A} \quad (17)$$

Contudo, a velocidade do atuador hidráulico é igual a  $4,38 \times 10^{-2}$  m/s. Esta velocidade deve ser decomposta para as posições onde correspondem ao centro de massa da estrutura suspensa pela torre do guindaste e a posição do gancho onde é içada a carga. Estas componentes são demonstradas na Figura 22, onde estão identificadas às distâncias em que o

centro de massa do conjunto e a carga estão em relação ao ponto de articulação. As medidas estão em mm e as linhas azuis representam as direções dos movimentos.

Figura 22 - Velocidade máxima de içamento (Modelo Global)



Fonte: Autor (2014)

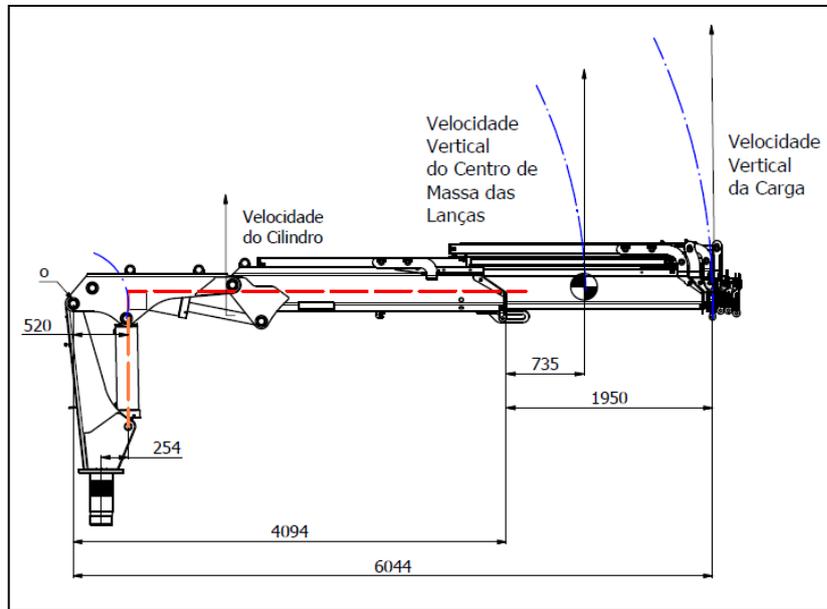
Com base nesta figura foi definida a equação que resulta nas velocidades verticais máxima do centro de massa e a velocidade vertical máxima da ponta da lança, onde é içada a carga. Como o cilindro está inicialmente na posição vertical, sua componente de velocidade inicial também será vertical, portanto, é possível conhecer as velocidades em qualquer ponto da estrutura móvel a partir da equação 18. Tem-se  $v$  é a velocidade em qualquer ponto em relação à articulação superior da torre,  $v_c$  é a velocidade do atuador hidráulico e  $x$  é a distância de qualquer ponto em relação à articulação do conjunto na posição horizontal.

$$v = \frac{v_c \cdot x}{520} \quad (18)$$

O procedimento de cálculo da velocidade também foi repetido para o Modelo Local, onde da mesma forma, é preciso conhecer a velocidades dos pontos onde estão concentradas as massas para que, do mesmo modo que no Modelo Global, sejam conhecidos os fatores dinâmicos. Para questões de cálculos, foi considerada a Figura 23. Neste caso, é possível observar que as lanças estão avançadas em relação à estrutura e que será considerado o centro

de massas somente do conjunto de lanças, para que posteriormente seja definido o momento gerado na extremidade da Capa da Lança, pois é a região onde serão analisadas as tensões.

Figura 23 - Velocidade máxima de içamento (Modelo Local)



Fonte: Autor (2014)

Deste modo, foram levantadas as velocidades dos pontos em questões, do centro de massa do conjunto de lanças e do gancho onde é içada a carga, dos modelos local e global. Os valores das velocidades citados são apresentados na Tabela 7.

Tabela 7 - Velocidades Máximas Verticais

Velocidades Máximas (Vh) em m/s		
	Centro de Massa Equipamento	Gancho
Modelo Global	0,209	0,356
Modelo Local	0,303	0,509

Fonte: Autor (2014)

Uma vez obtidas, as velocidades devem ser aplicadas na Equação 12 e com auxílio da Tabela 1, conforme apresentadas no capítulo 2. Também, são definidos os valores dos fatores dinâmicos,  $\Phi_1$  e  $\Phi_2$ , que devem ser levados em consideração e aplicados às forças gravitacionais envolvidas nos esforços do equipamento, são apresentados na Tabela 8.

Tabela 8 - Fatores Dinâmicos

	$\Phi 1$	$\Phi 2$
Modelo Global	1,10	1,11
Modelo Local	1,10	1,14

Fonte: Autor (2014)

Os fatores dinâmicos foram aplicados às forças pesos e os valores das cargas dinâmicas foram definidos e são apresentadas na Tabela 9 para o Modelo Global.

Tabela 9 - Cargas do Modelo Global

	Massa Equipamento	Carga de Içamento
Cargas Estáticas (N)	14600	56100
Cargas Dinâmicas (N)	16060	62301
Momento (N.m)	35493	246774
Momento Total (N.m)	282267	
Carga Dinâmica Total (N)	71262	

Fonte: Autor (2014)

Da mesma forma do Modelo Global, também foram definidas as cargas dinâmicas que deverão ser consideradas no Modelo Local, e são apresentadas na Tabela 10.

Tabela 10 - Cargas do Modelo Local

	Massa Equipamento	Carga de Içamento
Cargas Estáticas (N)	9304	37200
Cargas Dinâmicas (N)	10234	42280
Momento (N.m)	7522	82446
Momento Total (N.m)	89968	

Fonte: Autor (2014)

#### 4.3 CONDIÇÕES DE CONTORNO DO MODELO

Com a utilização do programa ANSYS, foram adicionadas as condições de contornos dos modelos, para tanto, foram adicionados os valores das cargas dinâmicas, acima apresentadas.

### 4.3.1 Condições de Contorno do Modelo Global

Para o Modelo Global, foram consideradas, para as condições de contorno, a carga dinâmica apresentada na Tabela 9. A carga dinâmica determinada por meio de cálculos foi aplicada na ponta da Capa da Lança. A região em que a carga foi aplicada se encontram os deslizadores das lanças, é a área em que toda a carga é suportada pelo conjunto de lanças, e seu próprio peso. Portanto, se torna conveniente que a carga seja aplicada nas mesmas. Para tanto, existem dois deslizadores, um para cada lado da seção inferior da lança, onde a carga a ser aplicada foi dividida entre as duas forças de igual magnitude na direção vertical e no sentido da força da gravidade.

Na Figura 24, é possível ver as cargas representadas por A e B. Também nesta figura, é possível ver que o engaste do modelo foi feito em duas regiões do pinhão. Estas regiões que foram aplicadas suportes fixos, são as regiões onde são montadas buchas de deslizamentos com a base do guindaste, nestes suportes foram limitados os movimentos nas direções x,y e z. Os suportes fixos são representados por C e D na Figura 24.

Figura 24 - Modelo Global com condições de contorno e carregamentos



Fonte: Autor (2014)

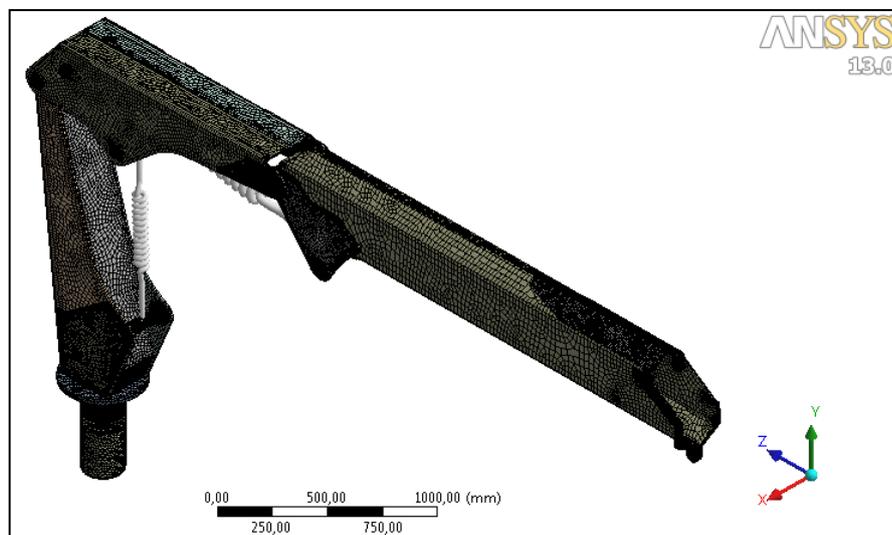
Os contatos entre as chapas são do tipo colados (*Bonded*), porém, os contatos entre os pinos e as buchas são do tipo não separado (*No Separation*). Este apresenta contatos semelhantes ao colado, entretanto, permite pequenos deslocamentos entre os componentes.

Ainda no Modelo Global, foram modelados dentro do Ansys duas vigas rígidas, não apresentando deformações, com seções circulares. Estas vigas representam os cilindros

hidráulicos, o de elevação e o de inclinação, e foram fixados em seus respectivos pinos de articulação.

A malha de elementos finitos foi gerada automaticamente pelo software. Os componentes modelados com *Mid-Surface* foram gerados com malhas com elementos de casca. Contudo, outros elementos como o pinhão, pinos e mancais foram gerados com elementos de sólido por toda sua geometria, inclusive em seus interiores. No total, foram gerados 399.206 nós e 216.260 elementos, que podem ser visualizados na Figura 25.

Figura 25 - Malha do Modelo Global

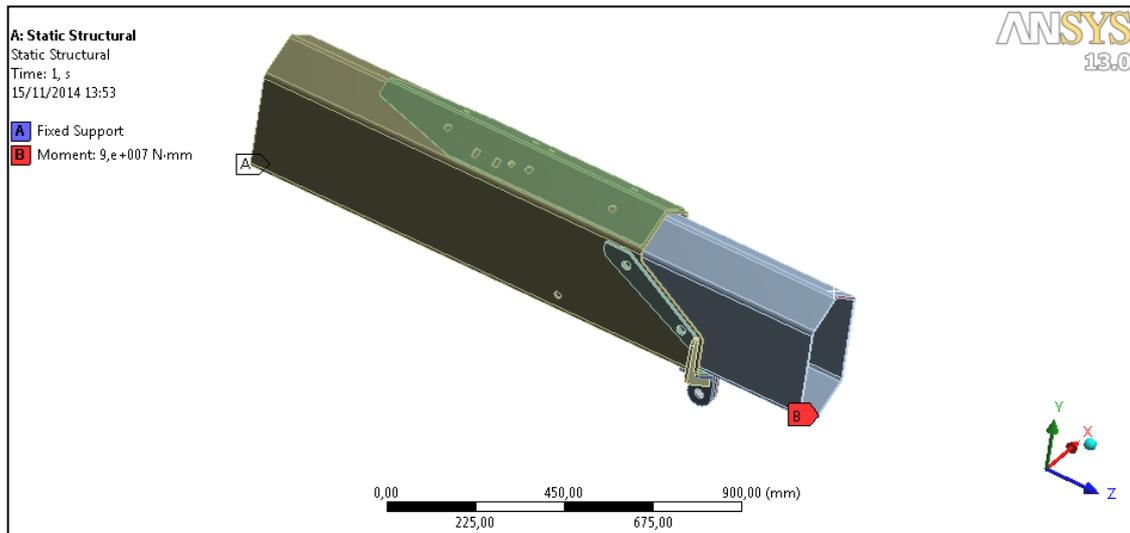


Fonte: Autor (2014)

#### 4.3.2 Condições de Contorno do Modelo Local

Já no Modelo Local, a fixação do conjunto se deu na área da parte traseira do corte da capa da lança. Como este conjunto representa uma secção intermediária entre a fixação com o conjunto completo e a força de içamento, foi aplicado na área frontal do corte da lança o momento gerado pela carga içada e massa das lanças. O valor do momento foi apresentado na Tabela 10 e representa a soma dos momentos (momento causado pela da carga e o momento causado pelo centro de massa dos componentes), ambos em relação ao último ponto de apoios da Capa da Lança. Na Figura 26, é possível ver o suporte fixo, representado por A, e a aplicação do momento, representado por B. Neste modelo, todos os contatos entre os componentes foram considerados colados (*Bonded*)

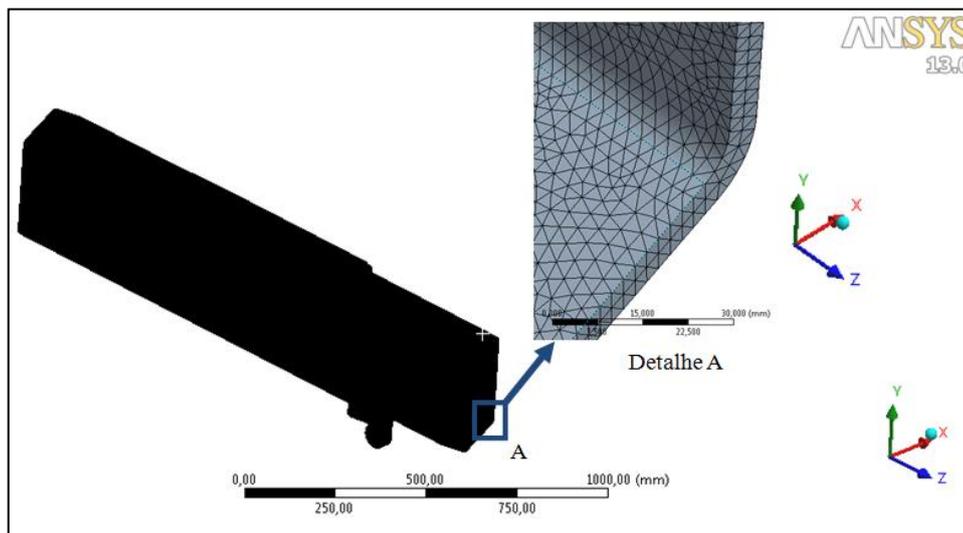
Figura 26 - Modelo Local



Fonte: Autor (2014)

Neste Modelo Local, a malha do Modelo Local foi gerada a partir de elementos de sólidos tetraédricos. A malha foi gerada com 9.031.462 nós e 5.586.827 elementos, ao menos dois elementos por espessura, e pode ser visualizada na Figura 27.

Figura 27 - Malha com elementos de sólido do Modelo Local



Fonte: Autor (2014)

#### 4.4 RESULTADOS DAS ANÁLISES DAS TENSÕES

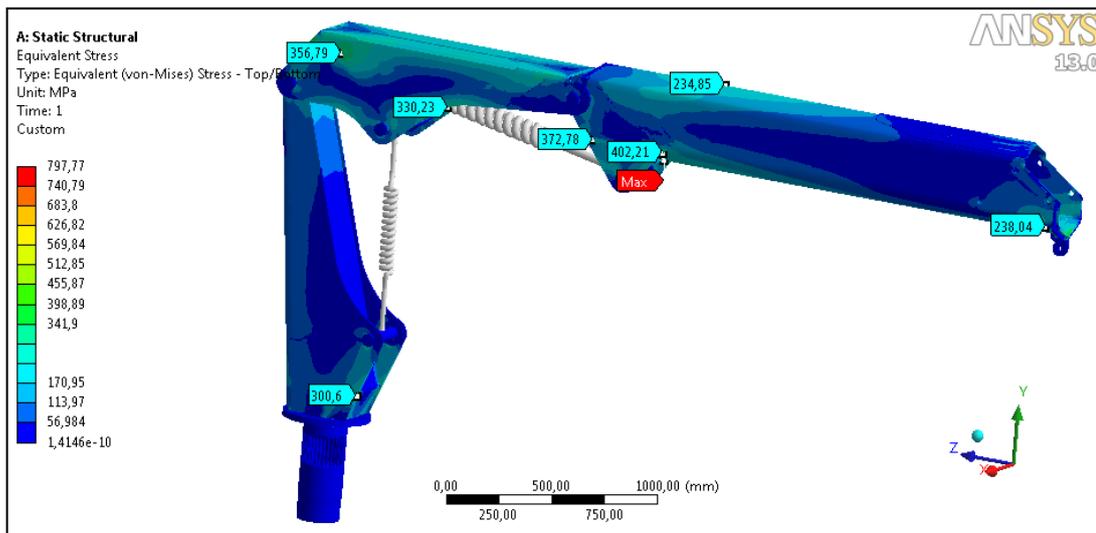
A análise por meio do método de elementos finitos teve por finalidade encontrar as máximas tensões equivalentes em seus componentes estruturais, além de se detectar regiões

críticas. Para tanto, foi utilizado o critério de von-Mises para a determinação das tensões, tanto para o Modelo Global quanto para o Modelo Local.

#### 4.4.1 Resultados das Análises de Tensões do Modelo Global

As regiões de tensões encontradas no modelo mostram uma transição suave entre elas, os resultados podem ser vistos na Figura 28. Também é possível observar que estas regiões estão bem distribuídas na estrutura, e que as chapas utilizadas para reforçar o guindaste se mostram uteis a esta finalidade. No entanto, existem algumas regiões que excederam o limite de segurança definido para este trabalho como sendo 346 MPa, com base na norma e apresentados no capítulo 3.

Figura 28 - Distribuição de tensões no modelo Global



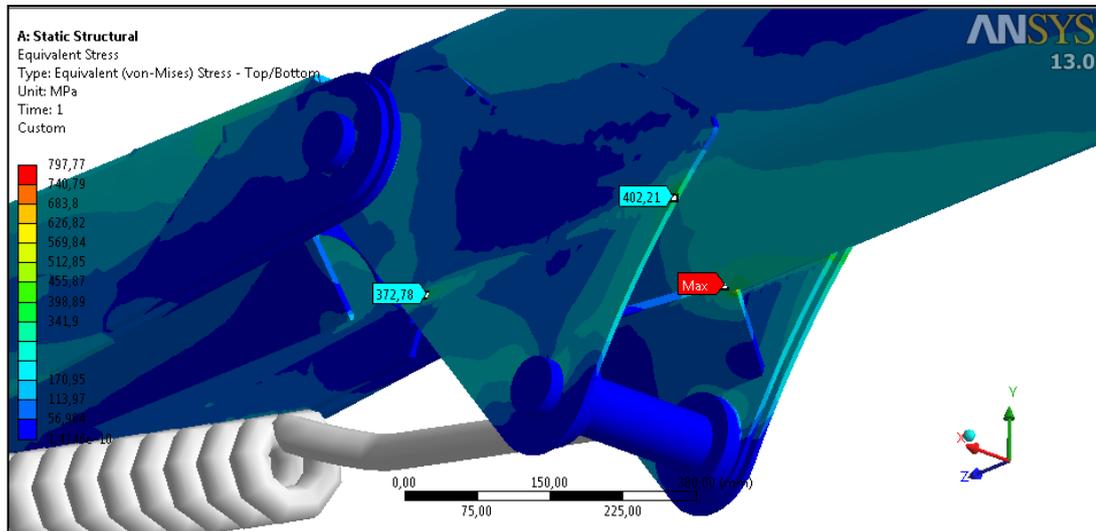
Fonte: Autor (2014)

Uma das regiões que apresentaram tensões elevadas está localizada nas laterais da parte traseira superior do braço. Conforme é visto na Figura 28, esta região apresentou tensão de Von Mises de 356,8 MPa, levemente acima do limite de segurança.

Um ponto crítico da integridade estrutural se deu na capa da lança, onde um conjunto de chapas que fazem a transferência da força entre o cilindro hidráulico de inclinação com a Capa da lança, gerando tensões de Von Mises de aproximadamente 400 MPa. Entretanto, o ponto mais crítico se dá em duas das chapas de reforço, localizada na parte inferior, que são causados pelo enrijecimento abrupto da estrutura, região em que uma parte mais flexível do

componente se encontra uma região mais rígida, aliado com cantos vivos das chapas unidas com o corpo da Capa da Lança. Estes pontos podem ser vistos em detalhes na Figura 29.

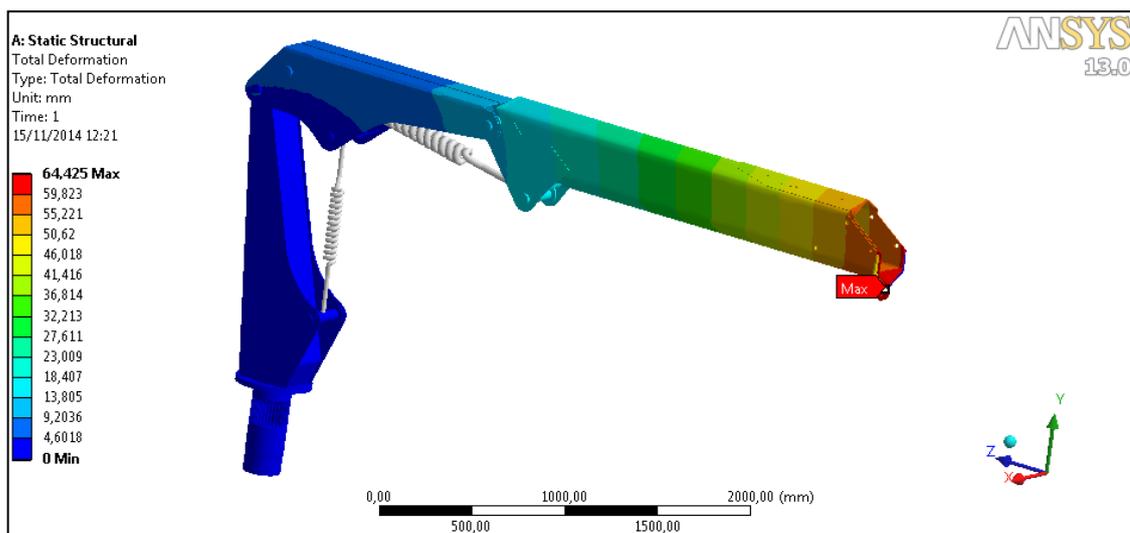
Figura 29 - Pontos de concentração de tensão na Capa da Lança (MPa)



Fonte: Autor (2014)

Neste mesmo modelo também foi possível determinar os deslocamentos do conjunto dos componentes, e o gráfico dos deslocamentos pode ser visto na Figura 30. A deflexão máxima, como esperado, se deu na extremidade da Capa da Lança chegando a 64,4 mm.

Figura 30 - Deslocamentos do Modelo Global (mm)

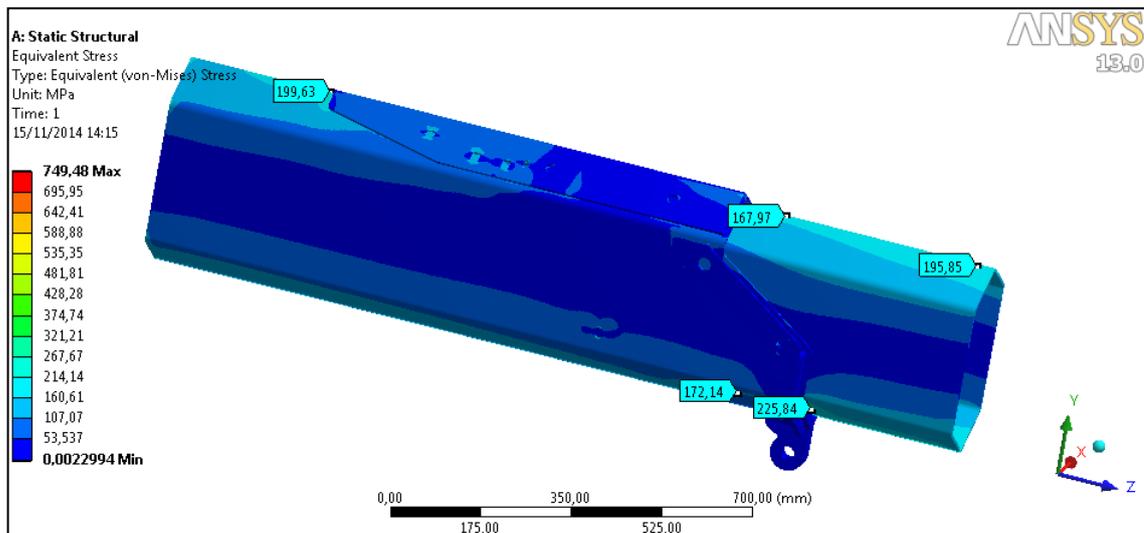


Fonte: Autor (2014)

#### 4.4.2 Resultados das Análises de Tensões do Modelo Local

No Modelo Local foi possível verificar que as tensões apresentadas não excedem o limite de segurança definido conforme a norma. Neste modelo também foram encontrados picos de tensões provenientes de regiões de contatos onde apresentam convergências de tensões que não condizentes com a realidade do equipamento. As distribuições das tensões podem ser vistas na Figura 31. Nesta figura é possível verificar que nas secções próximas da face onde momento foi aplicado, apresenta tensões maiores que as secções mais afastadas, isto porque o momento aplicado tende a gerar tensões maiores próximas da local em que foi aplicado. Entretanto, como o momento permanece constante ao longo de toda a geometria, podem-se desconsiderar estas regiões com tensões maiores próximas da face de aplicação da carga, considerando o princípio de Saint-Venant, que diz que quanto mais distante da extremidade em que a carga está atuando, mais uniforme será a distribuição das tensões.

Figura 31 - Distribuição de tensões de von Mises no Modelo Local (MPa)



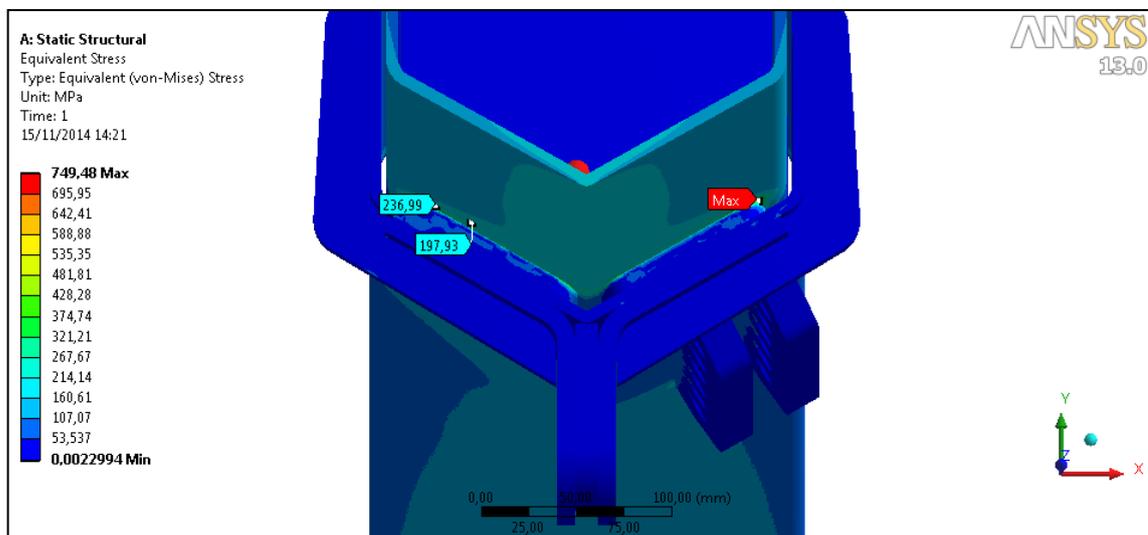
Fonte: Autor (2014)

No Modelo Local, também é possível notar que não existem regiões de tensões elevadas nos contatos entre a capa da lança com a primeira lança hidráulica, onde se encontram os deslizadores. Isto considera que o embutimento está adequado não oferecendo risco quanto à integridade estrutural de ambos os componentes. As regiões de tensões de Von Mises máximas verificadas na capa da lança encontram-se na região onde termina a chapa de reforço superior, utilizada para reforçar a região de contato com a primeira lança hidráulica.

Já na lança hidráulica, a tensão máxima encontrada esta na região inferior, próximo aos contatos com a capa da lança.

Neste Modelo Local foi possível observar alguns pontos de concentração de tensões elevadas entre a lança e o apoio inferior. Esta concentração de tensão gerada se dá por um ponto de singularidade de tensão, não condizendo com a realidade, por isso, não estão sendo consideradas as tensões deste ponto. O ponto de singularidade pode ser observado na Figura 32, destacado como Max.

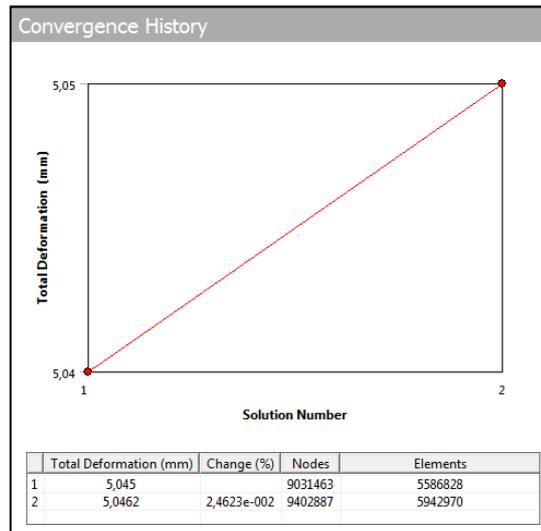
Figura 32 - Concentrações de Tensões do Modelo Local (MPa)



Fonte: Autor (2014)

No Modelo Local foi aplicado o estudo de convergência do deslocamento da malha, com o intuito de se verificar se o modelo apresenta uma malha adequada para a análise. O gráfico de convergência é apresentado na Figura 33, onde *Total Deformation* significa o deslocamento da geometria, *Changes* é a porcentagem da convergência, *Nodes* são os nós e *Elements* são os elementos gerados. Este estudo de convergência foi aplicado para os deslocamentos do modelo e foram especificados que fossem feitos 4 *loops* de refinamento da malha. Contudo é possível observar que a malha original estava adequada para a análise, pois a malha atingiu a convergência no primeiro *loop* apresentando uma convergência de 0,002% em relação à malha original e que o número de elementos criados na segunda malha foi irrelevante, assim como os valores de deslocamentos. Desta forma, foi possível garantir que o refinamento da malha está adequado para o modelo analisado.

Figura 33 - Gráfico do deslocamento com a convergência da malha

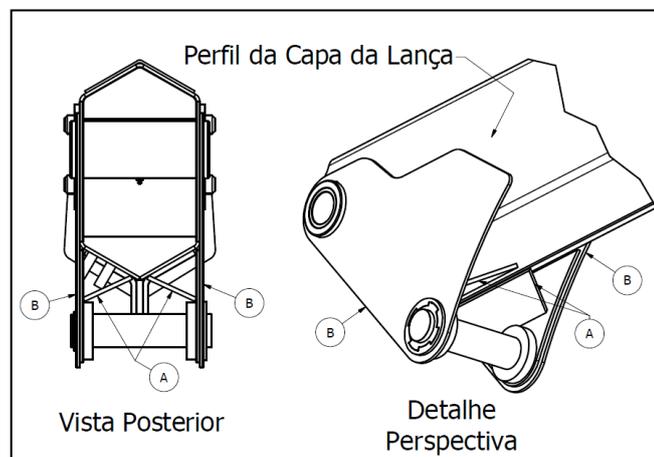


Fonte: Autor (2014)

#### 4.5 PROPOSTAS DE MELHORIAS DO PROJETO

A geometria Capa da Lança foi o componente que mais apresentou pontos críticos de tensões. As tensões apresentadas no MEF apresentaram dois pontos principais que devem ser consideradas melhorias para que o equipamento atenda as especificações de segurança definidas neste trabalho. Estas tensões superaram o limite máximo segurança de 346 MPa, e para tanto, foram feitas duas alterações nas geometrias, componentes A e B, visando minimizar os efeitos dessas concentrações de tensões. Os componentes com as melhorias propostas podem ser visualizadas na Figura 34.

Figura 34 - Componentes sugeridos para a melhoria

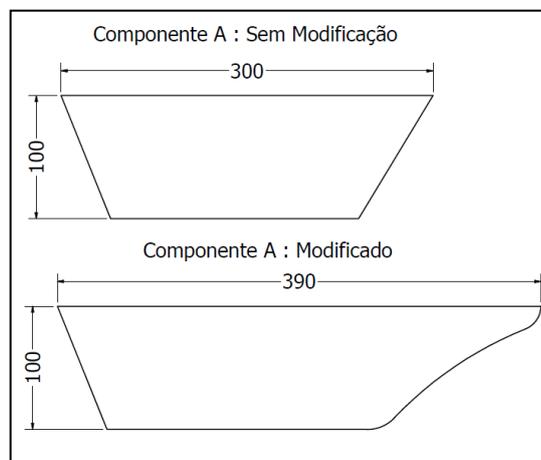


Fonte: Autor (2014)

A primeira alteração proposta diz respeito às duas chapas de reforço (A) localizadas na parte inferior da estrutura. Estas duas peças idênticas, são utilizadas como reforço entre a chapa que contém os mancais do cilindro hidráulico de inclinação, componente (B) com o perfil da Capa da Lança, conforme pode ser visto na Figura 34. Na extremidade frontal destas chapas, conectada com o perfil da lança, apresentaram tensões de von Mises de 798 MPa. Os motivos para esta concentração de tensão é o fato de que estes componentes apresentam na extremidade da conexão com o perfil da lança um canto vivo, como pôde ser identificado, sendo este um motivo para se encontrar concentração de tensões. Outro motivo que contribui, é o fato de que estas chapas enrijecem a estrutura de forma pontual.

Com o intuito de minimizar os efeitos concentradores de tensão, é proposta uma alteração da geometria dos componentes A. Para minimizar a mudança pontual de rigidez da estrutura, foi criado um prolongamento de 90 mm na extremidade frontal do componente. Além disso, foi criado na extremidade do componente um raio de 20 mm, com o objetivo de se eliminar o canto vivo. Estas alterações podem ser vistas na Figura 35.

Figura 35 - Componente (A), com e sem alterações (medidas em mm)



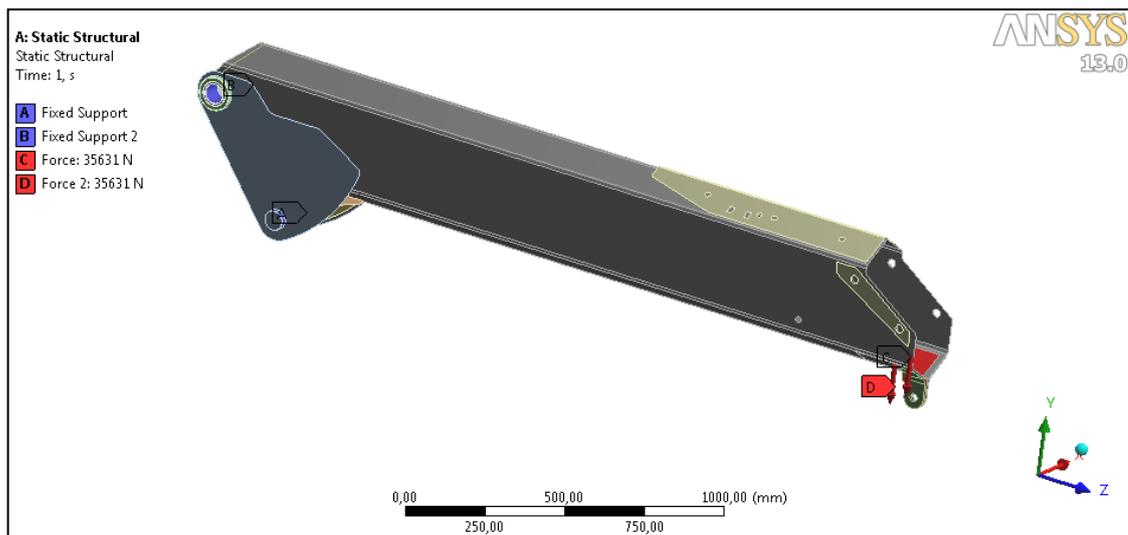
Fonte: Autor (2014)

A segunda alteração é proposta nos componentes (B), também apresentados na Figura 34. Estes componentes apresentaram tensões de Von Mises de 402 MPa, e que comprometem a segurança da integridade estrutural. O componente B pode ser considerado como um braço de alavanca, e como foi observada na Figura 29, a tensão máxima foi encontrada no ponto em que apresenta o momento máximo do componente. Para este componente é proposto o aumento da espessura da chapa, passando de 6,35 mm para uma espessura de 8 mm.

Os modelos foram alterados conforme as propostas de melhorias discutidas, e os mesmos foram analisados pelo Método de Elementos Finitos. Para este propósito, foi criado um modelo local analisado somente o componente da Capa da Lança, porém, as condições de contorno foram mantidas iguais ao Modelo Global para que não houvesse discrepâncias com os valores de tensões entre os dois modelos e para que ambos pudessem ser analisados e comparados. Todas as chapas foram alteradas utilizando a ferramenta *Mid-Surface*, da mesma forma que foi aplicada no Modelo Global.

No Modelo Local da capa da lança, apresentada na Figura 36, é possível ver os suportes e as cargas aplicados ao modelo. Neste caso foi fixado o pino, suporte A, e fixado as buchas, suporte B, ambos com restrições de deslocamento nas direções x, y e z. Também foram adicionadas as cargas, representadas por C e D. Estas cargas são idênticas às aplicadas no Modelo Global e apresentadas na Tabela 9.

Figura 36 - Modelo Local Capa da Lança

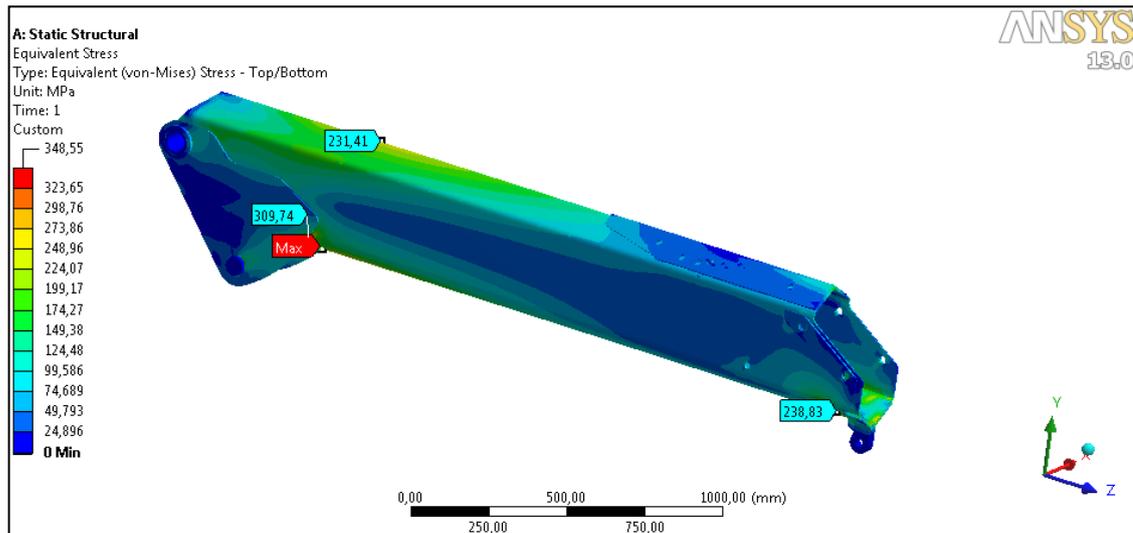


Fonte: Autor (2014)

Para este modelo foi utilizada a criação automática, que gera uma malha *default* do Ansys. Foram criados 54.021 elementos e 69.953 nós.

Após o processamento foi possível avaliar as tensões nas geometrias alteradas, conforme Figura 37. Nesta figura se constatou que as tensões mais elevadas no modelo inicial foram reduzidas. A máxima tensão verificada no componente A foi de 348,5 MPa, no mesmo ponto em que o modelo original apresentou 797 MPa. Já para o componente B a tensão de Von Mises foi reduzida de 402 MPa para 309,7 MPa.

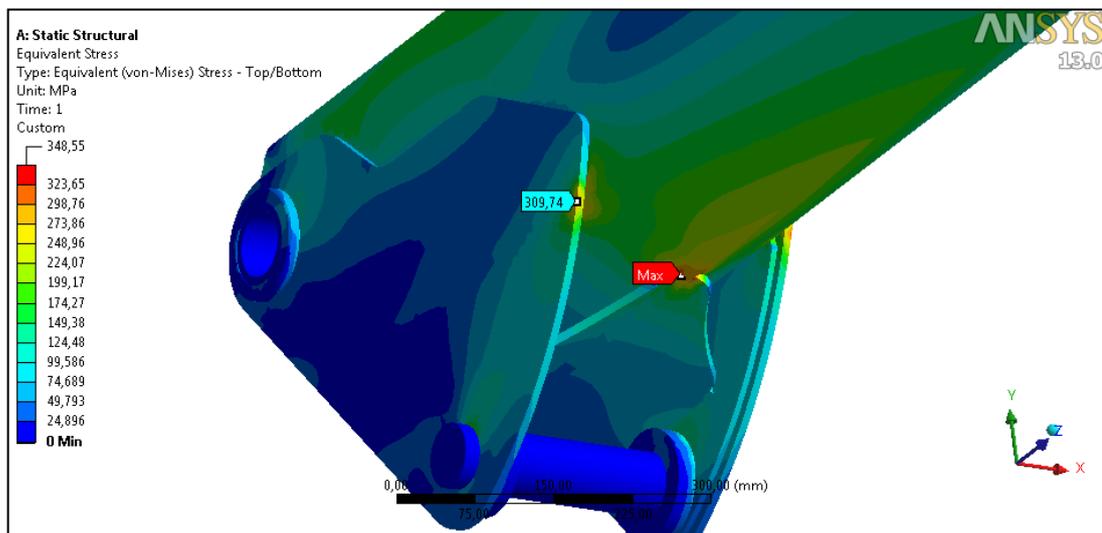
Figura 37 - Distribuição das tensões de Von Mises do modelo modificado (MPa)



Fonte: Autor (2014)

Um detalhe da região de análise é apresentada na Figura 38.

Figura 38 - Pontos de concentração de tensão no modelo modificado (MPa)



Fonte: Autor (2014)

#### 4.6 CONSIDERAÇÕES FINAIS

O componente do Braço do guindaste apresentou tensões de von Mises acima do limite estipulado para este projeto. A tensão encontrada, de 357 MPa, supera em aproximadamente 3% o limite de 346 MPa calculado e definido como sendo o limite de segurança da integridade estrutural do guindaste. Embora próximas ao limite, aconselhadas

medidas para aumentar a segurança deste ponto. Uma das possíveis medidas é soldar um reforço interno no braço na região em que foi indicada como sendo o ponto crítico.

As alterações realizadas para a melhoria do componente Capa da Lança se mostraram bastante eficientes, reduzindo em 56% as tensões no componente A. As medidas adotadas para reduzir o canto vivo e se reduzir a concentração de tensão se mostraram válidas nos modelos de elementos finitos analisados, porém, este ponto ainda representa um local de concentrações de tensões por apresentar na extremidade do componente A, na ligação com o perfil da Capa da lança, um ponto considerado pequeno.

O Modelo Local, criado para se analisar as tensões envolvidas na transferência do momento entre as lanças e a capa da lança, apresentaram tensões muito abaixo do limite de segurança. Porém, considera-se importante que este modelo seja utilizado para testar as demais configurações de momentos, provocados pelas cargas e massas das lanças pra todas os de alcances e seus respectivos pesos de içamento.

## 5 CONCLUSÃO

Os modelos criados pra as análises de elementos finitos condizem com o projeto de fabricação do guindaste TKA 23.700. Inúmeros equipamentos deste modelo verificado estão hoje no mercado e não apresentaram, em seu histórico, falhas estruturais. Pode se considerar o modelo de elementos finitos aqui apresentados, aliado com os conceitos da norma NBR 14768 (2012) abordados, como um modelo importante para a verificação de outros modelos de guindastes, além de ser uma ferramenta útil no desenvolvimento de novos equipamentos.

De modo geral, o equipamento analisado neste trabalho com a utilização dos modelos de elementos finitos, apresentou pontos de tensões acima dos valores máximos permitidos pela norma. Os pontos de tensões elevadas foram observados em algumas das geometrias que continham cantos vivos, o que elevaram as tensões acima do limite de segurança e algumas vezes acima até do limite de escoamento do material. Entretanto, algumas geometrias, embora não apresentassem cantos vivos, também apresentaram tensões críticas, porém, muito abaixo do limite de escoamento da chapa. Isto vem ao encontro com a situação de não serem observadas falhas da integridade estrutural neste equipamento em campo, mas que eventualmente poderão ocorrer se o equipamento for utilizado com severidade..

As propostas de melhorias sugeridas foram testadas utilizando o MEF e se mostraram eficientes para reduzir as concentrações de tensões localizadas. Isto demonstra que as melhorias analisadas poderão ser implementadas no projeto do TKA 23.700 para análise de campo.

Os conceitos de Modelo Global e de Modelo Local, que neste trabalho foram empregados, se mostraram de utilidade para a verificação estrutural de determinadas regiões. Isto permite rapidez nos processamentos dos cálculos e um refinamento maior dos modelos, diminuindo com isso as incertezas das análises.

Embora os Modelos de Elementos Finitos apresentados neste trabalho tenham apresentados valores coerentes, os mesmos não eliminam os ensaios físicos do equipamento para validação de protótipos de futuros projetos.

## BIBLIOGRAFIA

ANSYS, inc. **INTRODUCTION TO ANSYS MECHANICAL**. Customer Training Material: Ansys, nov. 2010

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 14768**: Guindastes – Guindaste articulado hidráulico – Requisitos. Rio de Janeiro: ABNT, dez. 2012.

ALVES FILHO, Avelino. **Elementos finitos: a base da tecnologia CAE**. 5.ed. São Paulo: SP : Érica, 2007.

ARNDT, Marcos. **O método dos elementos finitos generalizados adaptativo aplicado à análise de vibrações livres de eixo**. Campina Grande-Paraíba <<http://www.abcm.org.br/>> Aesso em 12 de Abril de 2014.

ALVES, Philipe Daniel. **Estratégia global-local aplicada ao método dos elementos finitos generalizados**. Dissertação (pós-graduação) Universidade Federal de Minas gerais. Belo horizonte, 2012.

AZEVEDO, Álvaro F.M. **Método de elementos finitos. Portugal**. 1ª ed., Portugal Faculdade de engenharia da Universisade do Porto, 2003.

BEER, Ferdinand P. e JOHNSTON, JR, E. russel. **Resistência dos Materiais**. 3ª ed. São Paulo: Pearson Makron Books, 1995.

EN 10025:1990 Hot rolled products of non-alloy structural steels - technical delivery conditions.

GERE, James M. e GOODNO, Barry J. 2009. **Mecânica dos Materiais**. 7ª edição. s.l. : Cengage Learning, 2009.

GRISON, Vagner. **Ferramentas para análise dinâmica e estrutural de um reboque de linha leve**. Dissertação (Mestrado). Universidade Federal do Rio Grande do Sul. Junho de 2005.

HIBBLER, R. C. **Resistência dos Materiais**. 5.ed. São Paulo : Prentice Hall, 2004.

IZI, Ridvan, Konyukhov, Alexander e Schweizerhof, Karl. **3D frictionless contact problems with large load-steps based on the covariant description for higher order approximation**. edição especial IASS-IACM 2012, <<http://www.elsevier.com/locate/engstruct>> Acesso em: 18 de maio. 2014.

KIM, N. H.; SANKAR, B. **Introdução a Análise e ao projeto em Elementos**. Rio de Janeiro: LTC, 2011.

SHIGLEY, Joseph E., MISCHKE, Charles R e BUDYNAS, Richard G. **Projeto de Engenharia mecânica**. 7ª ed. Porto Alegre : Bookman, 2005.

SIENIEKI, Marcin, GURGUL, Piotr e PASZYŃSK, Maciej. **Employing Adaptive Finite Elements to Model Squeezing**. International Journal of Materials, Mechanics and Manufacturing, Vol. 1, No. 4, November 2013.

SSAB. **Aços laminados de alta resistência**. Disponível em: <<http://www.ssab.com.br/Brands/Domex/Produtos/Domex-600-MC/>> . Acesso em: 18 maio. 2014.

TKA GUINDASTES INDÚSTRIA E COMÉRCIO E COMÉRCIO LTDA, Catálogo de produtos. Disponível em: < <http://www.tkaguindastes.com.br/guindastes.php>> Acesso em 21 de maio. 2014

ZIENKIEWICZ, O.C e Taylor, R. L. **The Finite Element Method**. 5ª ed. Vol 2, Butterworh Heinemann, 2000