

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

SAIMON LUIZ AMARAL CRISTOVAM

**AVALIAÇÃO DA INTEGRIDADE ESTRUTURAL DO BRAÇO DIANTEIRO DE UMA
RETROESCAVADEIRA**

CAXIAS DO SUL

2014

SAIMON LUIZ AMARAL CRISTOVAM

**AVALIAÇÃO DA INTEGRIDADE ESTRUTURAL DO BRAÇO DIANTEIRO DE UMA
RETROESCAVADEIRA**

Trabalho de conclusão do curso de Engenharia Mecânica apresentado como requisito para a obtenção do título de Engenheiro Mecânico na Universidade de Caxias do Sul.

Supervisor: Prof. Vagner Grison, Msc Eng.

CAXIAS DO SUL

2014

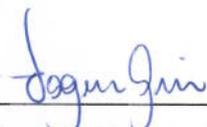
SAIMON LUIZ AMARAL CRISTOVAM

**AVALIAÇÃO DA INTEGRIDADE ESTRUTURAL DO BRAÇO DIANTEIRO DE UMA
RETROESCAVADEIRA**

Trabalho de conclusão do curso de Engenharia Mecânica apresentado como requisito para a obtenção do título de Engenheiro Mecânico na Universidade de Caxias do Sul.

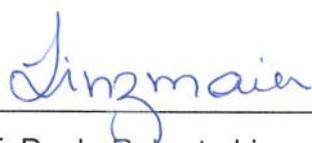
Aprovado em 28 / 11 / 14

Banca Examinadora:



Prof. Wagner Grison, Msc. Eng. Mec.

Supervisor de estágio



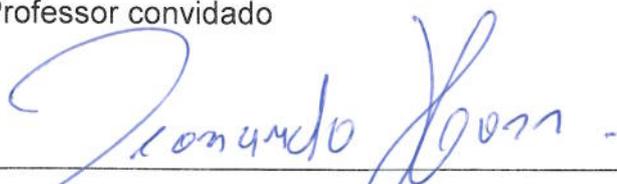
Prof. Paulo Roberto Linzmaier, Msc. Eng. Mec.

Professor convidado



Prof. Leandro Luís Corso, Dr. Eng. Mec.

Professor convidado



Leonardo Hoss, Msc. Eng. Mec.

Orientador da empresa

RESUMO

Este trabalho teve como objetivo realizar a análise estrutural do braço dianteiro de uma retroescavadeira destinada a obras na construção civil. Essa foi uma importante análise para a obtenção de uma visão geral quanto aos esforços e tensões atuantes na estrutura do braço, já que foram selecionadas as condições mais representativas em termos de carregamento. Estas condições correspondem ao transporte de material e ao nivelamento de terrenos, os quais serviram como base para determinação dos dados de entrada e definição das condições de contorno. A análise foi executada através de três maneiras com objetivo de obter um comparativo de dados: análise de elementos finitos, cálculos analíticos e testes experimentais. No método de elementos finitos empregou-se uma análise linear estática, sendo utilizado para isso um *software* de uso comercial. Para a validação das estruturas analisadas utilizou-se de um critério de comparação entre as tensões encontradas nas três análises versus a tensão de limite de escoamento do material. Em todas elas as tensões ficaram abaixo do limite de escoamento do material, significando que o braço dianteiro está apto para trabalhar nas condições que o mesmo é submetido em campo. Esta validação estrutural já era esperada, devido o braço dianteiro não possuir histórico de falhas, o que permite um futuro estudo de otimização da estrutura analisada, baseando-se na metodologia de cálculo desenvolvida neste trabalho.

Palavras-chaves: Método dos elementos finitos. Mecânica dos Sólidos.

ABSTRACT

This project had as target a structural analysis of a backhoe front arm intended to work in construction. That was an important analysis to achieve a general vision about the efforts and active tensions in the arm's structure, since it was selected the most representative terms in the loading issue. Those terms correspond to material transport and to ground flatness, that was used as base to the resolution of the entrance data and definition of the contour conditions. The analysis was executed through three ways intending to obtain comparative data: analysis of finite elements, analytical calculation and experimental tests. In the finite elements method it was applied a linear static analysis, using for that a commercial software. For the validation of the analyzed structures it was used a comparison criterion between the tensions found in the three analysis versus the limit tension of flowing material, meaning that the front arm is able to work in the conditions that it is applied in field. This structural validation was already expected, since it has no record of failures, which allows a future study about the optimization of the structure analyzed, based on the methodology of calculation developed in this work.

Key words: Finite element method, Solids Mechanics

LISTA DE ILUSTRAÇÕES

Figura 1 - Elipse de von Mises	20
Figura 2 - Transição do modelo físico para o modelo em elementos finitos.....	23
Figura 3 - Modelo em Elementos Finitos de Estrutura de Chassi de Caminhão	28
Figura 4 - Malha com descontinuidade e soluções	30
Figura 5 - Modelo do braço dianteiro analisado	31
Figura 6 - Retroescavadeira nivelando terreno	32
Figura 7 - Retroescavadeira transportando materiais	32
Figura 8 - Braço dianteiro modelado com todos seus componentes.....	33
Figura 9 - Simplificação da geometria	34
Figura 10 - Fluxograma de atividades das análises no MEF.....	35
Figura 11 - Modelo discretizado	36
Figura 12 - Aplicação das condições de contorno.....	37
Figura 13 - Geometria, forças e reações.....	38
Figura 14 - Braço seccionado.....	40
Figura 15 - Forças e geometria	41
Figura 16 - Pontos instrumentados	43
Figura 17 - Strain Gauge nos pontos 6, 7 e 14.....	43
Figura 18 - Vista 3D da análise CAE do braço na condição de nivelamento	44
Figura 19 - Vista lateral análise CAE do braço na condição de nivelamento	45
Figura 20 - Vista superior mostrando a simetria na análise	45
Figura 21 - Vista 3D da análise CAE do braço na condição de transporte.....	46
Figura 22 - Vista lateral análise CAE do braço na condição de transporte	46
Figura 23 - Vista superior mostrando a simetria na análise	47
Figura 24 - Reação no cilindro devido à variação do ângulo.....	48
Figura 25 - Propriedades da seção 9	48
Figura 26 - Força normal para condição de transporte de materiais	49
Figura 27 - Força cortante para condição de transporte de materiais	49
Figura 28 - Momento para condição de transporte de materiais	50
Figura 29 - Força normal para condição de nivelamento de terrenos	50
Figura 30 - Força cortante para condição de nivelamento de terrenos	51
Figura 31 - Momento para condição de nivelamento de terrenos	51

Figura 32 - Retro realizando operação de nivelamento com restrição	53
Figura 33 - Coleta de dados para operação de nivelamento.....	54
Figura 34 - Retro em operação de transporte de materiais.....	54
Figura 35 - Coleta de dados para operação de transporte de materiais	55
Figura 36 - Gráfico comparativo de tensões para nivelamento de terrenos	56
Figura 37 - Gráfico comparativo de tensões para transporte de materiais.....	57

LISTA DE SIGLAS

MEF	Método dos elementos finitos
CAD	<i>Computer Aided Design</i>

LISTA DE SÍMBOLOS

$F1$	Força de levantamento (kN)
V	Capacidade volumétrica da caçamba (m ³)
ρ	Densidade no material transportado pela caçamba (kg/m ³)
$L2$	Distância variável da origem até onde monta o cilindro (m)
$L4$	Distância variável da origem até onde monta a caçamba (m)
$L3$	Diferença entre $L4$ e $L2$ (m)
$H2$	Altura variável da origem até onde monta o cilindro (m)
$L4$	Altura variável da origem até onde monta a caçamba (m)
$L3$	Diferença entre $H4$ e $H2$ (m)
$A1$	Ângulo da origem com a montagem do cilindro (°)
$A2$	Ângulo da origem com a montagem da caçamba (°)
Θ	Ângulo da origem com o movimento do cilindro (°)
$L34$	Distância fixa da origem até onde monta o cilindro (m)
$L23$	Distância fixa da origem até onde monta a caçamba (m)
RCc	Reação no cilindro para transporte de materiais (kN)
$ROXc$	Reação na origem em X para transporte de materiais (kN)
$ROYc$	Reação na origem em Y para transporte de materiais (kN)
RCn	Reação no cilindro para nivelamento de terrenos (kN)
$ROXn$	Reação na origem em X para nivelamento de terrenos (kN)
$ROYn$	Reação na origem em Y para nivelamento de terrenos (kN)
y	Maior distancia do centróide até a aresta da secção (m)
$\sigma_{x'}$	Tensão devido ao momento (MPa)
$\sigma_{x''}$	Tensão devido a força normal (MPa)
τ_x	Tensão devido a força cortante (MPa)
$\sigma_{seções}$	Tensões totais em cada secção (MPa)
$\sigma_{seção5}$	Tensão na secção 5 (MPa)
$Fcil2$	Força do cilindro de basculamento da caçamba (kN)
$F3$	Força que ira atuar no tubo (kN)
M	Momento no tubo (Nm)
Mfa	Momento no tubo (Nm)
τ	Tensão devido ao torque no tubo (MPa)

T	Torque (kNm)
R_e	Raio externo do tubo (m)
R_i	Raio interno do tubo (m)
a	Distancia de onde é aplicada a força até a extremidade do tubo (m)
b	Distancia de onde é aplicada a força até a outra extremidade do tubo (m)
I_{tb}	Inércia do tubo (mm ⁴)
σ_5	Tensão no tubo (MPa)
σ'	Tensão de von Mises no tubo (MPa)

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 - Elementos básicos	26
Tabela 2 - Tensões calculadas analiticamente.....	52

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO	14
1.1	DESCRIÇÃO DA EMPRESA.....	15
1.2	JUSTIFICATIVA DO TRABALHO.....	15
1.3	OBJETIVOS DO TRABALHO.....	16
1.3.1	Objetivo geral.....	16
1.3.2	Objetivos específicos.....	16
2	REVISÃO BIBLIOGRÁFICA.....	17
2.1	TRABALHOS CORRELATOS	17
2.2	CONCEITOS PRINCIPAIS DE MECÂNICA DOS SÓLIDOS	19
2.2.1	Critérios de falhas	19
2.2.2	Limite de resistência à fadiga estimado.....	21
2.3	MÉTODO DOS ELEMENTOS FINITOS.....	21
2.3.1	Introdução ao método dos elementos finitos	22
2.3.2	Tipos de análise pelo MEF.....	23
2.3.2.1	Análise estática e dinâmica	23
2.3.2.2	Análise linear e não linear	23
2.3.3	Etapas de definição do MEF	24
2.3.3.1	Geometria da análise	24
2.3.3.2	Propriedades dos materiais.....	25
2.3.3.3	Condições de contorno.....	25
2.3.3.4	Geração da malha.....	25
2.3.3.5	Seleção dos elementos básicos	26
2.3.3.5.1	<i>Elementos de viga.....</i>	<i>27</i>
2.3.3.5.2	<i>Elementos de casca</i>	<i>27</i>
2.3.3.5.3	<i>Elemento sólido.....</i>	<i>28</i>
2.3.3.5.4	<i>Elemento de barra ou treliça</i>	<i>28</i>
2.3.3.6	Tamanho e número de elementos.....	29
2.3.3.7	Forma e distorção do elemento.....	30
3	DESENVOLVIMENTO DO TRABALHO	31
3.1	SITUAÇÕES DE TRABALHO.....	31

3.1.1	Nivelamento de terrenos.....	31
3.1.2	Transporte de materiais.....	32
3.2	MODELAMENTO EM CAD	33
3.2.1	Modelo de projeto.....	33
3.2.2	Simplificação da geometria	33
3.3	MÉTODOS	35
3.3.1	Pré-Processamento.....	35
3.3.1.1	Geração da malha e criação da casca	35
3.3.1.2	Geração das condições de contorno	36
3.3.2	Pós-Processamento.....	37
3.4	CÁLCULOS ANALÍTICOS.....	37
3.4.1	Cálculos de tensão.....	39
3.4.2	Cálculos de torção e flexão no tubo	41
3.5	DADOS EXPERIMENTAIS.....	42
4	ANÁLISE DOS RESULTADOS	44
4.1	RESULTADOS DAS ANÁLISES CAE	44
4.1.1	Nivelamento de terrenos e transporte de materiais	44
4.2	CÁLCULOS ANALÍTICOS.....	47
4.2.1	Cálculos no tubo	52
4.3	DADOS EXPERIMENTAIS.....	53
4.4	RESULTADOS E DISCUSSÕES	55
5	CONCLUSÃO	58
6	CONSIDERAÇÕES FINAIS	60
	BIBLIOGRAFIA	61
	ANEXO	63

1 INTRODUÇÃO

O presente trabalho será realizado na Empresa Randon Implementos e Participações – filial Randon Veículos, sediada em Caxias do Sul – RS e refere-se ao Estágio Obrigatório do Curso de Engenharia Mecânica pela Universidade de Caxias do Sul.

O recente elevado crescimento do setor da construção civil no Brasil, fez com que fabricantes de máquinas destinadas a este setor desenvolvessem projetos que focassem no aumento da produtividade de seus clientes aliado à segurança dos operários nas obras. Essa nova fase exige equipamentos que sejam versáteis e que realizem diferentes trabalhos dentro de um canteiro de obras.

As retroescavadeiras são de longe a máquina de terraplenagem preferida pelos clientes e as mais vistas em canteiros de obras de qualquer porte, por serem máquinas versáteis, ágeis e em geral com preço de locação muito baixo. A versatilidade da retroescavadeira deve-se certamente à presença de duas caçambas distintas na mesma máquina, uma à frente e outra atrás. A caçamba frontal da retroescavadeira mede cerca de 2,3m de largura e têm capacidade para aproximadamente 0,89m³ de volume. As retroescavadeiras utilizam geralmente a caçamba frontal para nivelamento de terreno, carregamento de caminhões, transporte de material dentro da obra, entre outras aplicações. Algumas empresas de pavimentação utilizam-na para espalhar asfalto na execução de pavimentações em substituição de vibro-acabadoras. A caçamba traseira da retroescavadeira possui várias dimensões diferentes e sua largura varia desde 35cm até 80cm com capacidades e formatos variados. A máquina retroescavadeira utiliza esta caçamba para escavar valas, piscinas, baldrame ou desagregar terra para carregamento de caminhões. Esta caçamba da retroescavadeira também é usada para demolição de construções como paredes, pilares, colunas e para o assentamento de tubos. A profundidade de escavação varia entre 3 e 4 metros e a lança pode ser simples ou telescópica.

Com o emprego deste veículo em diferentes tipos de terrenos e em diferentes condições de carregamento fica evidenciada a preocupação com a sua integridade estrutural. Portanto este trabalho tem como o objetivo a análise da integridade estrutural do braço dianteiro pelo método dos elementos finitos (MEF).

1.1 DESCRIÇÃO DA EMPRESA

A Randon Veículos foi inaugurada em 1974, montadora de veículos especiais tipo "fora de estrada", foi a primeira indústria 100% nacional a fabricar veículos automotores no Sul do país. Focada em desenvolver produtos com tecnologia atualizada, segurança e ergonomia, marcou presença no mercado de 15 países além de tornar-se a maior fabricante nacional do gênero. O seu destaque neste âmbito propiciou a sua participação de maneira significativa no mercado externo, ocupando lugar de destaque entre os fabricantes mundiais.

Localizada no complexo industrial do bairro Interlagos em Caxias do Sul – RS, a Randon Veículos juntamente com a Randon Implementos, Randon Consórcios, Fras-le, Suspensys, Master, Jost e Castertech, forma o grupo de empresas Randon. Em sua totalidade, as empresas Randon contam com aproximadamente 12200 funcionários. Destes, cerca de 110 pessoas formam a equipe de colaboradores da Randon Veículos.

Atualmente, a Randon Veículos atua no mercado de dois diferentes segmentos: mineração e construção civil.

1.2 JUSTIFICATIVA DO TRABALHO

Em tempos de crescente competição e globalização, o desenvolvimento de projetos bem embasados tornou-se vital para o crescimento ou até mesmo, para a sobrevivência das empresas. No entanto, muitas ainda apresentam dificuldades devido à falta de atualização de seus projetos.

Diante deste cenário, verificou-se que a montadora de veículos especiais Randon Veículos, empresa onde será realizado este trabalho de estágio, não possui registros do desenvolvimento do projeto estrutural da retroescavadeira, contando somente com os desenhos originais do produto que foi lançado em 2002.

Com base nisto, torna-se difícil precisar se o produto está superdimensionado, ou se o mesmo pode vir a apresentar falhas em uma aplicação mais crítica.

Este trabalho tem como objetivo definir a aplicação mais crítica para o braço dianteiro da retroescavadeira, e conseqüentemente definir um projeto estrutural com registros e com embasamento teórico.

1.3 OBJETIVOS DO TRABALHO

1.3.1 Objetivo geral

Avaliar a integridade estrutural do braço dianteiro de uma retroescavadeira, utilizando o método dos elementos finitos.

1.3.2 Objetivos específicos

Baseados no objetivo geral ficam estabelecidos os seguintes objetivos específicos.

São eles:

- Revisão da bibliografia;
- Análise dos esforços atuantes no braço dianteiro quando submetido as condições de carregamento, através da análise estática linear, pelo método dos elementos finitos;
 - Análise dos esforços atuantes no braço dianteiro quando submetido às condições de carregamento, através de cálculos analíticos;
 - Comparar os valores teóricos com resultados experimentais;
 - Análise crítica dos resultados.

2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

Primeiramente nesta revisão bibliográfica serão apresentados artigos e trabalhos relacionados com o MEF, após será abordada uma breve revisão dos conceitos de resistência dos materiais, mecânica dos sólidos, critérios de falhas e os fundamentos do MEF. Essa revisão tem como objetivo servir como base aos assuntos tratados no decorrer desse trabalho.

2.1 TRABALHOS CORRELATOS

Bosnjak et al (2008), executaram uma análise de falha de um suporte de uma escavadora de roda de caçambas utilizada na mineração a céu aberto. Através do MEF foi verificada a ocorrência de uma zona de concentração de tensões, que veio falhar durante a utilização da máquina. Junto com o MEF foi utilizada uma investigação experimental, que por fim conclui que a falha no suporte foi consequência de uma superposição de efeitos negativos causados pelo inadequado dimensionamento e erros de geometria do suporte desta estrutura.

Rusiński et al (2008), realizaram um estudo numérico e experimental sobre a quebra do braço de uma carregadeira utilizada na mineração em subsolo. Este estudo utilizou o MEF para a análise numérica, encontrando a distribuição de tensões encontradas nas extremas condições de carregamento do conjunto. Também foram analisados a macografia, micrografia e os testes de dureza do material do braço. Através dessa investigação concluiu-se que para as condições de trabalho desse equipamento, a falha do componente era inevitável.

Baadkar (2010), realizou análise estrutural em um reboque com duas diferentes condições de serviço. A análise estrutural estática através do MEF encontrou pontos de fratura da estrutura e com isso pode-se avaliar as possíveis causas destas falhas. A análise estática da condição normal de carga / descarga mostrou que, as tensões máximas são mais do que recomenda o limite de segurança. A análise de fadiga realizada em condições normais de carga / descarga revelaram que a margem de segurança para a região crítica contra a carga é baixa e podia causar falha. Por fim executou-se análises mais aprofundadas sobre o problema nos pontos determinados pelo MEF, e concluiu que um novo desenho deveria ser proposto para superar a falha estática gerada nas condições de carga.

Ingole e Bhope (2011), realizaram a análise estrutural utilizando o MEF em um implemento agrícola, objetivando encontrar a distribuição das tensões no conjunto a fim da obtenção da redução de peso, custos de fabricação e ao mesmo tempo não prejudicar a segurança contra falhas da estrutura. No caso 1 foi projetado um chassi com variação de áreas das secções transversais e verificou-se uma diferença de 45,88 kg em relação ao atual. No caso 2 houve variação de áreas das secções transversais e longitudinais e verificou-se uma diferença de 77,15 kg. Já no caso 3 houve variação de áreas das secções de barras transversais e longitudinais e mudança de posição das travessas principais do quadro do chassi, obtendo diferença de 87,95 kg. Finalmente, no caso 4 considerou-se as áreas das secções transversais variáveis de travessas e longarinas, resultando numa diferença de 111,73 kg. Com isso, o autor conclui que o caso 1 estaria descartado devido a pouca perda de massa. Os casos 2 e 3 ficaram indicados para pequena escala de produção, pois houve redução de massa em ambos os casos sem gerar impactos na produção. O autor destaca que o caso 4 ficou mais indicado para casos em que há grande escala de produção, pois há redução significativa de massa, porém gera impactos na produção.

Qurechi e Sagar (2012), forneceram uma plataforma para entender a modelagem de uma lança de uma retroescavadeira, que já foi realizado por outros pesquisadores para suas aplicações relacionadas e pode ser útil para o desenvolvimento de novas lanças de retroescavadeira. Embora os autores não tenham realizado análises dinâmicas, concluíram que a inércia desempenha um grande efeito estrutural neste tipo de simulação e que o efeito máximo de inércia pode ser traçada especialmente para novos modelamentos de lança de retroescavadeira, obtendo assim resultados seguros de tensões resultantes na vida segura da lança.

Soares et al (2012), realizaram o estudo e o desenvolvimento de um chassi automotivo para um veículo elétrico de pequeno porte através do MEF. Nesse estudo do chassi foi utilizado o conceito de rigidez estrutural para avaliação do mesmo, sendo que os valores numéricos resultaram 22% superiores aos valores experimentais. Os autores concluíram que essa diferença pode ter sido causada pela tensão residual nas regiões soldadas dos tubos do chassi, que não foram representadas no modelo numérico.

2.2 CONCEITOS PRINCIPAIS DE MECÂNICA DOS SÓLIDOS

Fundamentalmente, as análises feitas em mecânica dos sólidos considera que um elemento cúbico do volume do material representa o estado de tensão no ponto escolhido. Os carregamentos e vínculos aplicados à uma determinada estrutura podem ter infinitas configurações, porém, conforme Hibbeler (2004), ao nível de um elemento de tensões, seus efeitos se resumem à seis componentes. O estado plano de tensões corresponde ao caso mais comumente encontrado em componentes de máquinas e estruturas sob ação de cargas externas. Ele é representado pela combinação dos componentes da tensão normal σ_x , σ_y e uma componente da tensão de cisalhamento τ_{xy} .

Quando um corpo é carregado abaixo do limite da região onde o material que o compõe tem comportamento linear, também conhecida como região elástica, não haverá deformação permanente após a remoção da carga. Já se o corpo em análise for carregado acima da região elástica, superando sua tensão de escoamento o material terá uma deformação plástica residual quando o carregamento for removido. No intervalo linear, a relação uniaxial entre a tensão e a deformação sofrida por determinado material é regida pela lei de Hooke. (HIBBELER, 2004).

Torque é o momento que tende a torcer o membro em torno de seu eixo longitudinal. Seu efeito é de interesse principal no projeto de eixos. Qualquer vetor de momento que seja colinear com um eixo de um elemento mecânico é denominado vetor de torque. Diz-se que uma barra submetida a um momento dessa classe está sob torção. (SHIGLEY et al, 2005).

Cargas transversais aplicadas sobre vigas desenvolvem força cisalhante interna e momento fletor que variam ao longo do seu eixo longitudinal. Para projetar uma viga adequadamente é necessário determinar o cisalhamento e o momento máximo na viga. Para fazer isso, deve-se expressar o cisalhamento e o momento máximo como funções das posições arbitrárias sobre o eixo da viga. (HIBBELER, 2004).

2.2.1 Critérios de falhas

Para um sistema mecânico trabalhar com segurança, deve determinar geometria e material de forma que este sistema não alcance valores limitantes

máximos permitidos. Existem numerosos critérios de falhas na literatura destinados tanto para carregamentos estáticos quanto para carregamentos variáveis. A determinação do critério de falha que será utilizado em uma análise é determinada pelas experiências do profissional ou por especificações de determinado projeto.

A maioria das falhas em máquinas acontece devido a cargas que variam no tempo, e não esforços estáticos. Essas falhas acontecem a níveis de tensão significativamente inferiores aos valores da resistência ao escoamento do material (NORTON, 2004).

Frequentemente, em situações envolvendo tensões combinadas normais e de cisalhamento ao mesmo ponto, é necessário definir uma tensão equivalente que possa ser usada para representar a combinação de tensões. Sendo assim a tensão equivalente de von Mises permite tratar casos de tensão multiaxial combinada a tensões de cisalhamento como se fossem devido a um carregamento de tração pura (NORTON, 2004). Assim, de acordo com a definição do critério de von Mises a falha do material ocorre como mostrado na equação (2.1):

$$\sigma_f = \frac{1}{\sqrt{2}} \sqrt{(\sigma_x - \sigma_y)^2 + (\sigma_y - \sigma_z)^2 + (\sigma_z - \sigma_x)^2 + 6(\tau_{xy}^2 + \tau_{yz}^2 + \tau_{zx}^2)} \quad (2.1)$$

Sendo:

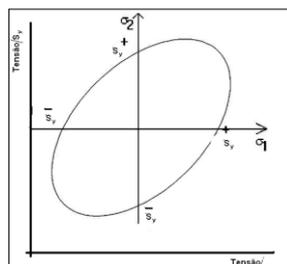
σ_n a tensão normal atuante ao longo do eixo n [Pa]

τ_{mn} a tensão cisalhante atuante no plano mn [Pa]

σ_f a tensão correspondente à falha do material [Pa]

A figura 1 ilustra a elipse de von Mises. Qualquer ponto no seu interior corresponde a um estado de plano de tensões seguro:

Figura 1 - Elipse de von Mises



Fonte: Norton (2ª edição).

2.2.2 Limite de resistência à fadiga estimado

A melhor informação a respeito da resistência à fadiga de um material para vida finita, ou o seu limite de fadiga para vida infinita provém de ensaios com montagens reais ou com protótipos de um projeto real. Na impossibilidade destes ensaios e se não existirem dados disponíveis de resistência à fadiga é necessário fazer uma estimativa do limite de fadiga (NORTON, 2004),

A partir de ensaios experimentais são especificadas relações entre a resistência máxima à tração e o limite de fadiga, sendo que estes podem ser usados como uma estimativa da resistência à fadiga de determinado material. Sendo assim, o limite de resistência à fadiga é representado pela a máxima tensão admissível suportada por determinado corpo sem que haja falhas devido à fadiga no material. Essas relações são citadas a seguir onde S_e' é o limite de fadiga estimado e o S_{ut} é a máxima resistência à tração suportada pelo material (SHIGLEY et al, 2005).

$$\rightarrow S_e' = 0,504S_{ut} \text{ para } S_{ut} < 1460 \text{ Mpa}$$

$$\rightarrow S_e' \cong 740 \text{ MPa para } S_{ut} \geq 1460 \text{ MPa}$$

2.3 MÉTODO DOS ELEMENTOS FINITOS

Em diversas áreas da engenharia problemas complexos são praticamente impossíveis de serem resolvidos por meio de uma solução analítica. Desta forma este problema é dividido em pequenas partes, com o objetivo de simplificar cada uma destas partes e, as suas soluções individuais acabem trazendo a solução do todo. Com base nisso ocorreu o desenvolvimento do Método dos Elementos Finitos, MEF, que consiste de forma simplificada, na divisão de sistemas contínuos em sub-regiões da geometria simples de tamanho finito, tornando-o assim em um sistema discretizado (ALVES F^o, 2006).

O desenvolvimento de produtos mais eficientes e otimizados tem demonstrado uma constante evolução, através do método citado, porém esta realidade somente tem se tornado possível pelo constante avanço e aumento da velocidade no processamento de dados que os computadores e *softwares* vêm apresentando.

A busca por sofisticadas ferramentas para ajudar a resolver os frequentes problemas de engenharia que são gerados nos mais diversos campos de atuação é constante. O potencial de aplicação do MEF pode ser utilizado na avaliação de estruturas e desempenho de componentes, na análise de resistência a esforços, avaliação de comportamento ao impacto, frequência característica de estruturas e componentes, além de outras áreas (FAGAN, 1992).

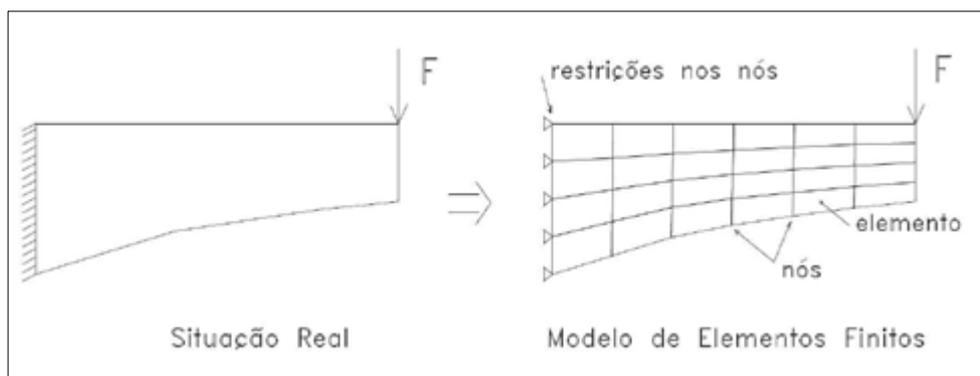
De maneira geral pode-se considerar que a metodologia de estudo por elementos finitos tem o objetivo de produzir soluções aproximadas, que podem ser aplicadas de forma genérica, independente do corpo, da estrutura ou da condição de carregamento, produzindo resultados que podem ser considerados precisos e confiáveis quando utilizado de maneira correta (ALVES F^o, 2006).

2.3.1 Introdução ao método dos elementos finitos

Este método permite que a estrutura em estudo tenha forma geométrica, carregamento e condições de contorno quaisquer. Transforma-se um modelo físico com infinitas incógnitas em um modelo finito, definido por nós, elemento e condições de contorno, como mostrado na figura 6. Inicialmente, o domínio destas regiões é dividido em subdivisões, chamadas de elementos, onde estes são conectados por pontos chamados de pontos nodais. A variável a ser determinada é assumida para atuar em cada elemento numa distribuição pré-definida, com o número e o tipo do elemento escolhido através da distribuição do corpo de modo que resulte numa distribuição aproximadamente adequada. Conforme Zienkiewicz, Taylor e Zhu (2005), "... como a capacidade de todos os computadores é finita, problemas contínuos só podem ser resolvidos através de manipulação matemática".

A função desejada é aproximada através da distribuição em cada um dos Elementos por um polinômio (linear, quadrático ou ainda de maior ordem) ou por uma função trigonométrica utilizando os valores da função dos nós. Estes nós são selecionados de forma a manter a continuidade ao longo das fronteiras dos elementos.

Figura 2 - Transição do modelo físico para o modelo em elementos finitos



Fonte: Panceri (2004)

2.3.2 Tipos de análise pelo MEF

Antes da aplicação do MEF, deve ser definido qual será a análise a ser desenvolvida. Análises pelo MEF podem variar entre análises estáticas ou dinâmicas e lineares ou não lineares.

2.3.2.1 Análise estática e dinâmica

Em algumas situações é razoável considerar que ações são aplicadas de um modo suficientemente lento, tornando desprezíveis as forças de inércia. Nestes casos a análise se designa análise estática, nela são determinados deslocamentos, tensões, deformações, forças nas estruturas e resultantes do carregamento aplicado (AZEVEDO, 2003).

Quando uma estrutura é submetida a ações dinâmicas, deve ser considerada a variação no tempo, e as forças de inércia associadas às acelerações a que cada um dos componentes fica sujeito, sendo assim a análise se torna dinâmica (ANDRADE, 2011).

2.3.2.2 Análise linear e não linear

Na análise de uma estrutura sólida, é habitual considerar que os deslocamentos provocados pelas ações exteriores são muito pequenos quando comparados com as dimensões dos componentes da estrutura. Nestas circunstâncias, admite-se que não existe influência da modificação da geometria da

estrutura na distribuição dos esforços e das tensões (AZEVEDO, 2003), neste caso a análise é linear e todo o estudo é feito com base na geometria inicial indeformada.

Não-linearidades estruturais ocorrem quando o nível de tensão aplicada superam o limite de escoamento do material. A característica fundamental é a mudança da rigidez da estrutura em função da carga aplicada, que fica evidente quando é desenhada a curva carregamento vs deformação nos casos em que esta situação não-linear ocorre. À medida que a carga é aplicada na estrutura, de forma incremental, a deformação difere do comportamento linear definido pela Lei de Hooke.

A característica de não-linearidade estrutural resulta de vários fatores, que podem ser agrupados nestas principais categorias:

1. Variação de estado: possui relação direta com o comportamento de variação do carregamento, incluindo variação de estado e forma de contato entre a estrutura e a carga aplicada;
2. Não-linearidades geométricas: grandes deformações podem causar uma resposta não-linear da estrutura devido a mudança da geometria;
3. Não-linearidades dos materiais: relações não lineares entre *tensão vs deformação* são as causas mais comuns que levam a esta condição. Podem ser causadas por efeitos do ambiente, tempo de aplicação da carga e histórico de carregamento.

2.3.3 Etapas de definição do MEF

A seguir encontram-se detalhadas as etapas utilizadas para a definição da análise para a solução através do MEF. É importante a eficiente utilização destas etapas para a obtenção de resultados convergentes ao problema analisado.

2.3.3.1 Geometria da análise

A geometria da peça a ser analisada deve servir como um molde para a construção da malha. Quanto menor o tamanho do elemento, ou quanto mais elevada for a sua ordem, melhor a malha representará a geometria que foi baseada (PINTO Fº, 2004).

Uma geometria limpa facilita a construção da malha. Entende-se por geometria limpa aquela onde não existem vazios internos, onde chanfros, arredondamentos, roscas e detalhes são construídos por último, e estes detalhes não são usados como referência na construção (ALVES F^o, 2007).

2.3.3.2 Propriedades dos materiais

A maioria das análises usando o MEF, assume que o material é isotrópico e homogêneo. As principais propriedades dos materiais que são necessárias para a caracterização de um modelo para uma análise linear estática utilizando MEF são o módulo de Young, o coeficiente de Poisson, o módulo de cisalhamento e a densidade do material (PINTO F^o, 2004).

2.3.3.3 Condições de contorno

As condições de contorno são aquelas que não fazem parte do modelo, mas que são atribuídas a ele na tentativa de representar o seu ambiente de aplicação sendo agregadas ao modelo como cargas e restrições. As cargas podem ser na forma de força, momento, pressão, gravidade e entre outras. As restrições podem impedir rotações ou deslocamentos gerados pelas cargas em uma ou mais direções. Também é possível impor ao modelo deslocamentos conhecidos visando analisar a configuração dos esforços resultantes (PINTO F^o, 2004).

2.3.3.4 Geração da malha

O processo de discretização do modelo de MEF é também conhecido como a geração da malha, sendo a malha a maneira possível de se comunicar com o programa de MEF. A precisão da solução depende primeiramente da qualidade da malha e a qualidade é definida normalmente pela convergência do problema. Os deslocamentos globais devem convergir para um valor estável e os outros resultados devem convergir localmente (PINTO F^o, 2004).

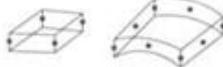
Outra medida mais subjetiva é a aparência da malha, a sua capacidade de representar visualmente a geometria da peça. Uma malha com boa aparência não necessariamente é a melhor malha, mas uma malha de má aparência quase sempre

indica um sinal de problema. Uma malha de boa aparência possui elementos regulares, com boa forma e as transições de secções devem ser suaves e graduais sem elementos distorcidos (OLIVEIRA, 2007).

2.3.3.5 Seleção dos elementos básicos

De acordo com Fagan (1992, p. 25), *softwares* comerciais de elementos finitos dispõem de mais de uma centena de diferentes elementos a disposição do projetista. Primeiramente, deve-se definir o tipo de análise a ser executada, pois só isto já exclui a grande maioria dos elementos disponíveis. Em seguida, o projetista deve estabelecer a dimensionalidade do modelo, ou seja, se ele será unidimensional, bidimensional ou tridimensional, o que praticamente direciona à escolha do elemento. Na tabela 1 estão representados os elementos mais encontrados nos *softwares*.

Tabela 1 - Elementos básicos

Tipo de elemento	Graus de Liberdade	Forma
Massa	-	
Barra 2D	u, v	
Viga 2D	u, v, θ_z	
2D Sólido Isoparamétrico Tensão no Plano Deformação no Plano Assimétrico	u, v	
Interface 2D	u, v	
Casca Assimétrica	u, v, θ_z	
Barra 3D	u, v, w	
Viga 3D	u, v, w $\theta_x, \theta_y, \theta_z$ x, y	
Sólido Isoparamétrico 3D	u, v, w	
Casca 3D	u, v, w $\theta_x, \theta_y, \theta_z$ x, y	
Interface 3D	u, v, w	

Fonte: Fagan (1992, p. 26)

As propriedades dos elementos disponíveis definem os dados de empenho mais importantes de um programa MEF. A qualidade de um modelo de computação é dependente do tamanho da malha utilizada. Os elementos existentes podem ser divididos em unidades com projeção bidimensional, elementos com projeção tridimensional e barras com projeção linear.

2.3.3.5.1 Elementos de viga

Pode-se denominar uma viga como sendo uma estrutura caracterizada por possuir um comprimento maior que sua seção transversal, submetida a carregamentos contidos no plano da estrutura (HIBBELER, 2004).

Segundo a formulação do elemento de viga de Timoshenko, é considerado que as seções planas se mantêm planas. Contudo, supõe-se que uma seção normal ao eixo da viga não mantêm essa característica após a deformação. Deste modo é possível considerar a deformação devida ao corte (TIMOSHENKO; GERE, 1994).

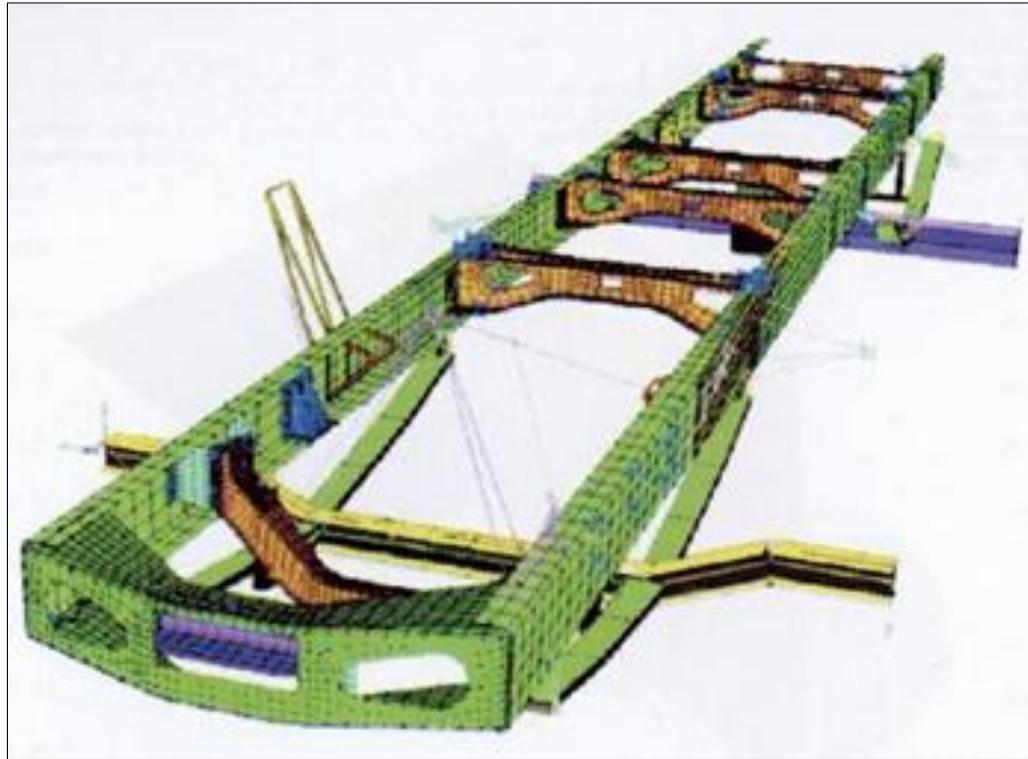
Enquanto a formulação do elemento de viga de Euler-Bernoulli afirma que os deslocamentos verticais de todos os pontos de uma mesma seção transversal são pequenos e iguais ao eixo da viga, o deslocamento lateral segundo o eixo y é nulo e, as seções transversais normais ao eixo da viga antes da deformação, permanecem planas e ortogonais ao eixo após a deformação.

2.3.3.5.2 Elementos de casca

O elemento de casca é amplamente utilizado para simular elementos cujo comprimento e a largura são muito maiores que a espessura. Segundo Wyardt, Coulon, Pardoen, Remacle e Lani (2008) o uso de elementos de casca permite limitar o número de graus de liberdade necessários para uma previsão satisfatória de resposta. Para isto existem alguns *softwares* comerciais que permitem um refinamento maior do modelo.

Na figura 3, pode-se visualizar a estrutura de um chassi de caminhão, cujas chapas das almas e abas das longarinas e travessas estão sujeitas a carregamentos que são transmitidos na forma de ações no plano dessas chapas e carregamentos locais que flexionam essas chapas, (ALVES F^o, 2006, p. 284).

Figura 3 - Modelo em Elementos Finitos de Estrutura de Chassi de Caminhão



Fonte: Alves F^o (2006, p. 284)

2.3.3.5.3 Elemento sólido

Os Elementos Sólidos não possuem semelhança com os elementos descritos acima. Geralmente são utilizados em componentes com geometria complexa, oriundos de fundições e forjarias. Usualmente utilizam-se dois tipos de elementos para análise, os elementos com formato tetraédrico, contendo quatro nós e três graus de liberdade por nó totalizando doze graus de liberdade. Quando existe a necessidade de uma maior precisão, é utilizado o elemento tetraédrico parabólico com quatro nós nas suas extremidades.

2.3.3.5.4 Elemento de barra ou treliça

Uma treliça é definida como uma série de elementos estruturais retos (barras), de comprimento muito maior que as dimensões de sua seção transversal, e que conectados uns aos outros em suas extremidades compõem uma estrutura reticulada. O encontro das barras constitui as juntas que são articuladas. Todos os esforços nesse tipo de estrutura são aplicados nas articulações ou nós. Existem

aplicações onde carregamentos são impostos entre os nós, porém de acordo com o conceito de Cargas Nodais Equivalentes, elas podem ser substituídas por carregamentos impostos apenas nos nós. As treliças planas apresentam uma disposição em que todas as barras e esforços estão em um mesmo plano. No caso de treliças espaciais, a disposição geométrica das barras e forças assume um aspecto multi-direcional. Decorre destas definições que as barras de uma treliça transmitem somente esforços axiais de tração ou compressão (FEODOSIEV, 1980).

Existe uma classificação para os elementos de barra. Uma categoria é capaz de transmitir momentos e são definidos pela posição das extremidades, material, seção transversal, um vetor de orientação, os momentos de inércia de área e pela rigidez torsional. Sua limitação de uso baseia-se no fato de que na definição da seção transversal essa permanece plana e perpendicular ao eixo do elemento durante todo o processo de análise. A segunda categoria de elemento de barra não é capaz de transmitir momentos, mas somente esforços axiais e podem ser definidos como longas barras com juntas esféricas nas extremidades. A sua definição é feita apenas pelo material e área da seção transversal (ADAMS, 1999).

2.3.3.6 Tamanho e número de elementos

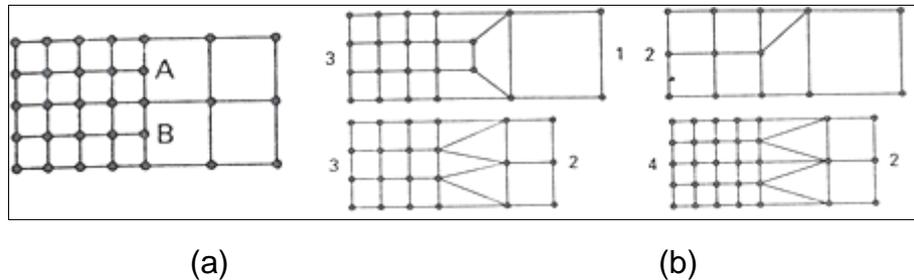
O tamanho dos Elementos e o número são relacionados diretamente, pois com o aumento no número de elementos, automaticamente o tamanho do elemento tende a diminuir. Estes fatores dependem do modelo que está sendo analisado. Quando o modelo apresenta seções com maior nível de detalhes, com a aplicação de elementos lineares com tamanho elevado, podem ocorrer distorções e com isso a redução na precisão da discretização. Por outro lado o elevado número de elementos pode acarretar um tempo maior de análise e a necessidade de processadores mais velozes.

Assim sendo, pode-se elevar o refinamento da malha, ou seja, diminuir o tamanho do elemento em determinadas regiões, obtendo desta forma maior acuracidade em pontos críticos e em outras áreas menos representativas, pode ser aplicado um grau de refinamento reduzido, simplificando assim a análise.

Podem também ocorrer falhas na malha conforme figura 4(a) onde nos nós "A" e "B" não estão totalmente conectados, o que ocasiona um problema de descontinuidade neste ponto na análise. Algumas soluções, conforme figura 4(b)

podem ser adotadas para a união entre Elementos de tamanhos diferentes, eliminando assim o problema de descontinuidade.

Figura 4 - Malha com descontinuidade e soluções



Fonte: Fagan (1992, p. 31)

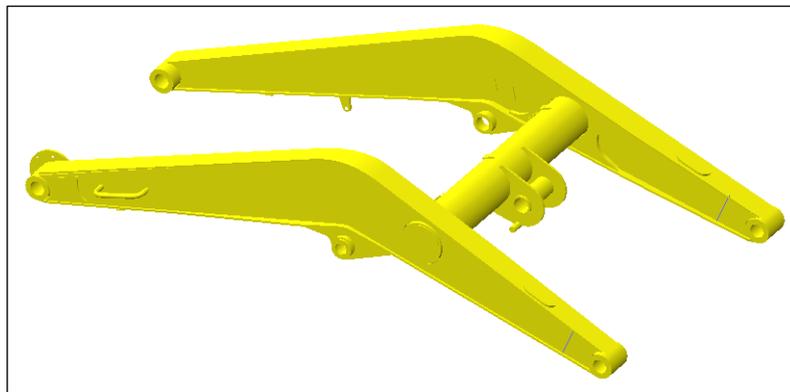
2.3.3.7 Forma e distorção do elemento

Durante a análise podem ocorrer somatórios de erros causados por distorções, por este motivo é importante que todos os elementos sejam os mais regulares possíveis. Os limites de distorção são difíceis de serem mensurados, e dependem muito da variação da distribuição em que os elementos estão representados. Se as variações que ocorrem não apresentarem grandes distorções, não serão gerados erros significativos.

3 DESENVOLVIMENTO DO TRABALHO

Neste trabalho foi avaliado um conceito de braço dianteiro de retroescavadeira, assim buscando um projeto com registros técnicos de seu desenvolvimento. Abaixo se encontra a figura 5 do modelo de braço analisado, modelo este que conta somente com um cilindro de basculamento na caçamba dianteira.

Figura 5 - Modelo do braço dianteiro analisado



Fonte: AUTOR (2014)

3.1 SITUAÇÕES DE TRABALHO

A utilização mais comum de trabalho do braço dianteiro é quando o mesmo é submetido a nivelamento de terreno e transporte de materiais.

3.1.1 Nivelamento de terrenos

Esta utilização é muito comum em terrenos que necessitam de um piso completamente regular para construção de edifícios, campos de futebol, piscinas ou até mesmo para uma plantação, a pior condição para esta aplicação é quando é utilizada a máxima força de desagregação de materiais do sistema hidráulico que é de 87,5kN. O sistema hidráulico é acionado por uma bomba de engrenagens acoplada diretamente na tomada de força da transmissão essa acionada pelo motor, o sistema hidráulico tem o conceito Load-Sensing, funcionando com equilíbrio de

pressão, garantindo alimentação simultânea de duas ou mais funções. A figura 6 mostra a retroescavadeira nivelando um terreno.

Figura 6 - Retroescavadeira nivelando terreno



Fonte: AUTOR (2014)

3.1.2 Transporte de materiais

Outra aplicação muito comum para retroescavadeiras é o transporte de carga utilizado para movimentar itens durante uma obra e para carregar caminhão. Normalmente a pior condição para essa aplicação é quando a caçamba dianteira fica carregada com sua capacidade máxima, ou seja, com um metro cúbico de terra. A figura 7 mostra a retro transportando terra com uma caçamba completamente coroadada.

Figura 7 - Retroescavadeira transportando materiais



Fonte: AUTOR (2014)

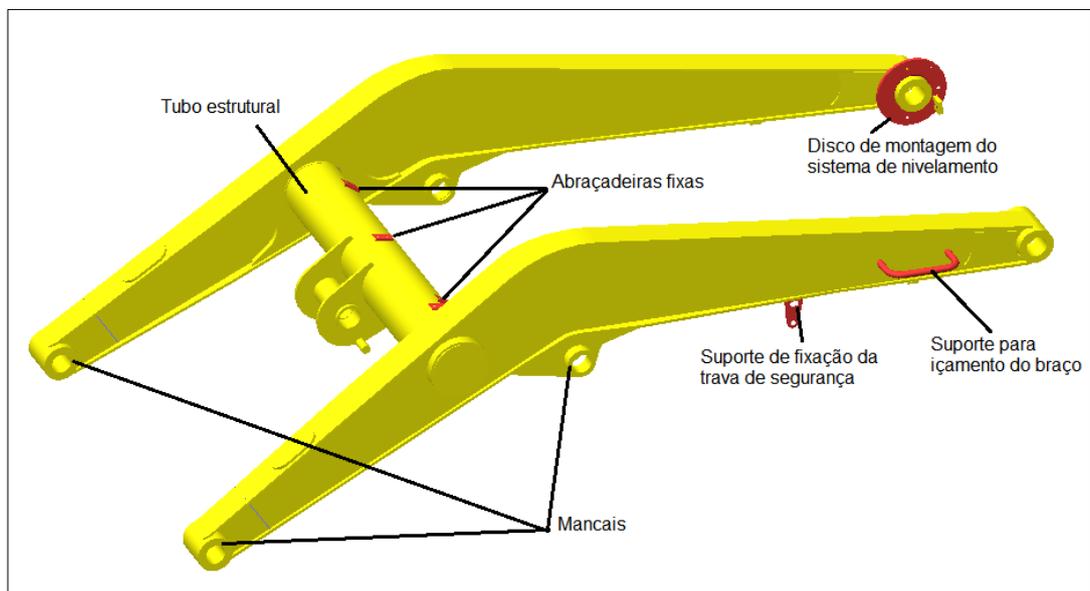
3.2 MODELAMENTO EM CAD

O modelo foi feito com *software* de CAD PRO-ENGINEER 5.0 2009, sendo modelado em peças individuais e após será feita a montagem do conjunto incluindo as chapas estruturais e o tubo estrutural utilizado como reforço.

3.2.1 Modelo de projeto

O modelo real que foi criado é o próprio projeto completo do braço dianteiro em estudo. Na figura 8 observa-se o braço completo incluindo suportes para içamento do braço, base para abraçadeiras fixas, suporte de fixação da trava de segurança do mesmo, disco de montagem do sistema de nivelamento, mancais e o tubo estrutural.

Figura 8 - Braço dianteiro modelado com todos seus componentes



Fonte: AUTOR (2014)

3.2.2 Simplificação da geometria

A criação de um modelo simplificado teve como objetivo o desenvolvimento das geometrias que foram utilizadas para análise pelo método de elementos finitos.

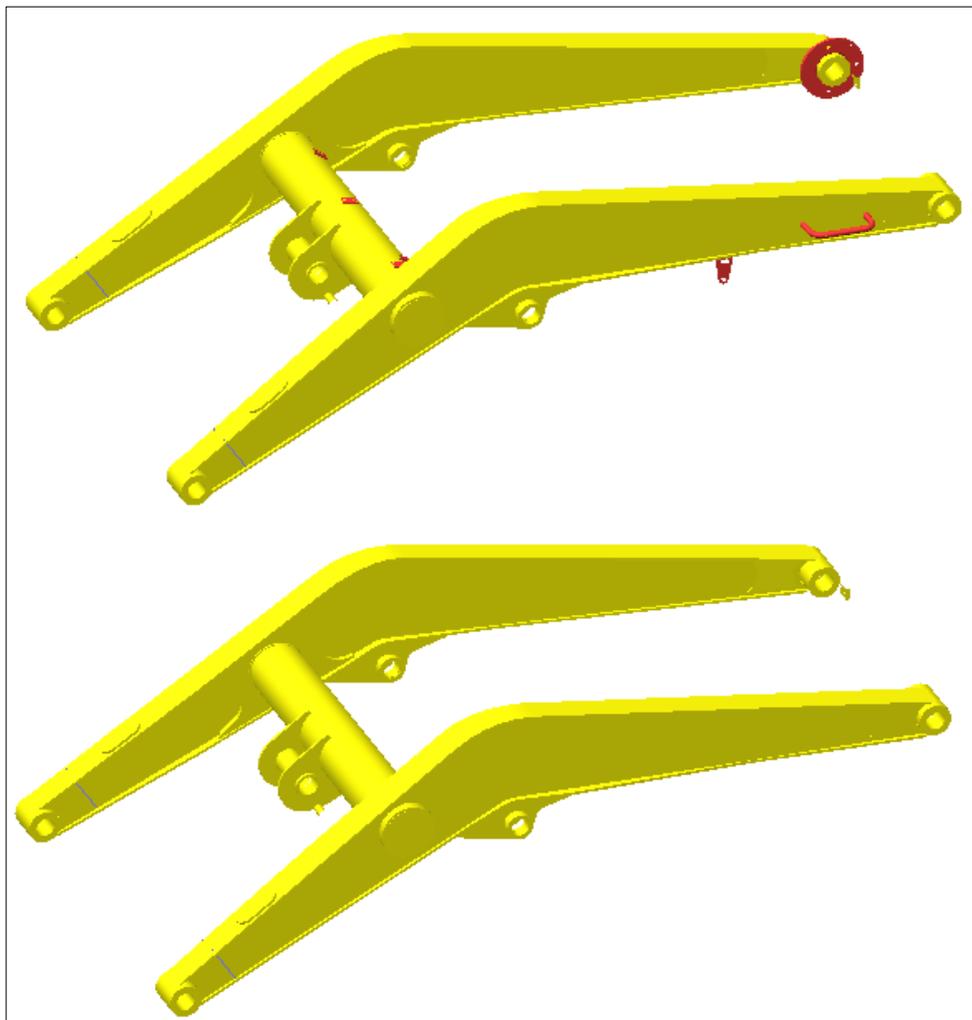
Nestes modelos foram realizadas simplificações que melhoram as condições para a geração da malha, reduzindo o tempo de análise.

Na primeira etapa foram removidos dos modelos todos os componentes que não influenciam a análise. Foram retirados do braço os suportes e as bases das abraçadeiras.

Na segunda etapa ocorreu a simplificação das geometrias onde foram retirados raios, chanfros, roscas e furos que não são elementos estruturais.

Na figura 9 é possível verificar um comparativo do modelo do braço dianteiro completo e depois de realizadas as simplificações da geometria, no braço completo as peças excluídas estão em vermelho.

Figura 9 - Simplificação da geometria

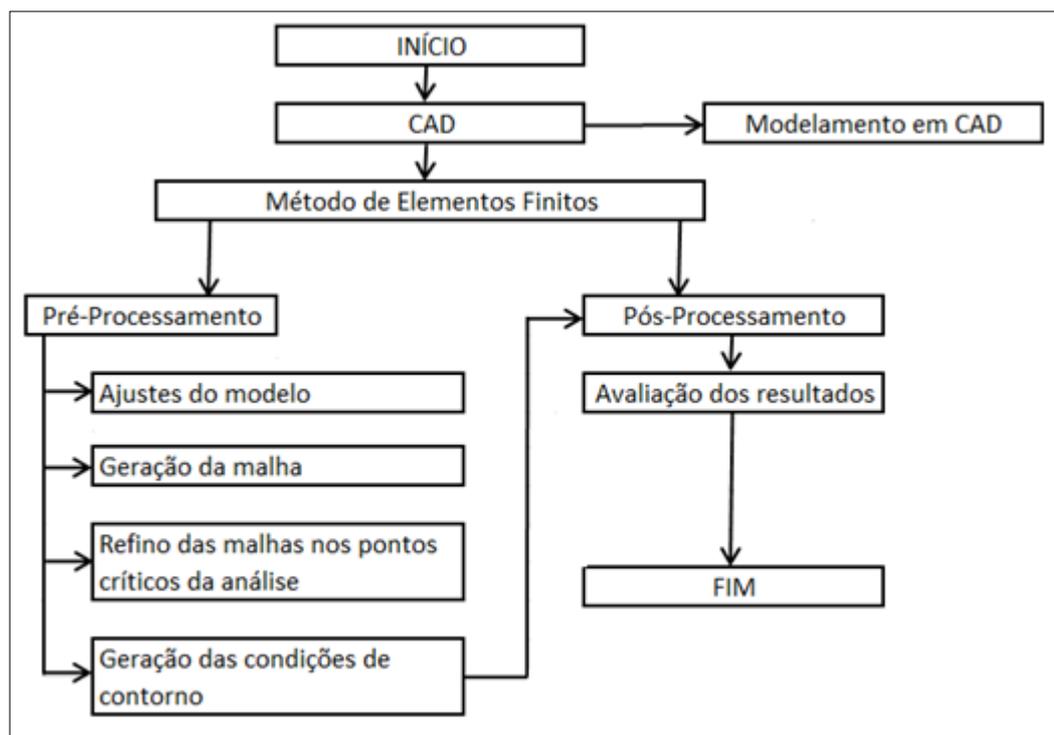


Fonte: AUTOR (2014)

3.3 MÉTODOS

Para a análise pelo método de elementos finitos foi utilizado o programa LMS STRUCTURE, software utilizado para cálculo estrutural. As análises numéricas foram desenvolvidas conforme fluxograma apresentado na Figura 10.

Figura 10 - Fluxograma de atividades das análises no MEF



Fonte: AUTOR (2014)

3.3.1 Pré-Processamento

Na etapa de pré-processamento foi realizada a criação do modelo numérico a partir da criação da casca e geração da malha e aplicação das condições de contorno.

3.3.1.1 Geração da malha e criação da casca

A criação da casca se dá pela linha média de cada chapa existente no modelo, juntamente com a criação da casca de cada chapa é feita a simplificação da geometria onde nessa etapa são retirados do braço os suportes, as bases das

abraçadeiras os raios, cordões de solda e todos os componentes que não são avaliados na análise CAE.

O modelo é composto por 311411 nós e 311966 elementos. Sendo 300309 quadriláteros lineares, 2615 triangulares lineares e 9042 hexaédricos lineares. Na figura 11 podemos visualizar a criação da malha no modelo em análise.

Figura 11 - Modelo discretizado

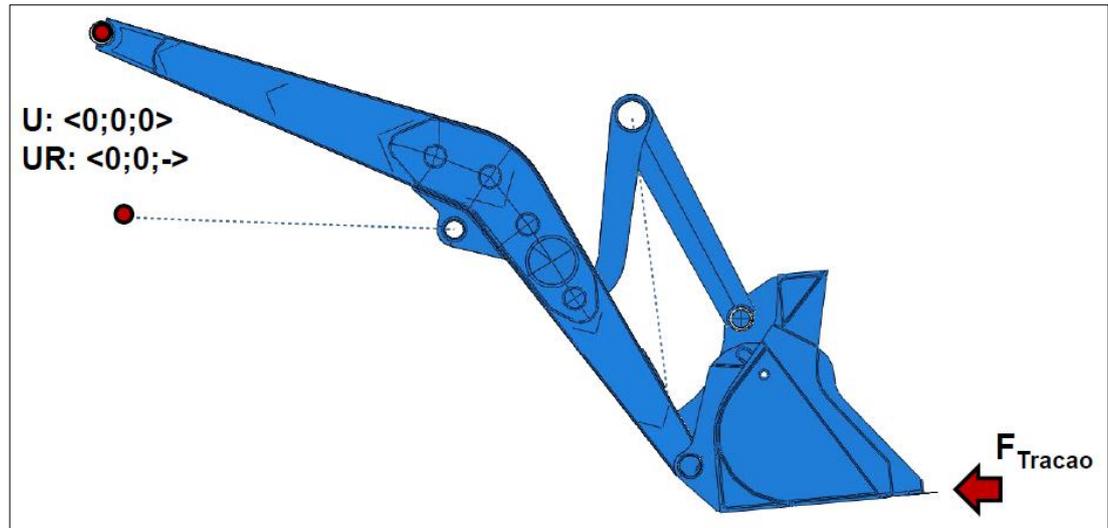


Fonte: AUTOR (2014)

3.3.1.2 Geração das condições de contorno

Nesta etapa foi realizada a aplicação das condições de contorno da análise. Para essa definição foram consideradas as forças aplicadas sobre o conjunto e as fixações. Foi considerado a fixação do braço no chassi da máquina e também a fixação do cilindro também no chassi e aplicado a força simulando uma situação real de campo. A figura 12 mostra essa condição.

Figura 12 - Aplicação das condições de contorno



Fonte: AUTOR (2014)

3.3.2 Pós-Processamento

Após aplicação de todos os parâmetros necessários para a análise e condições de contorno, foi executada a simulação.

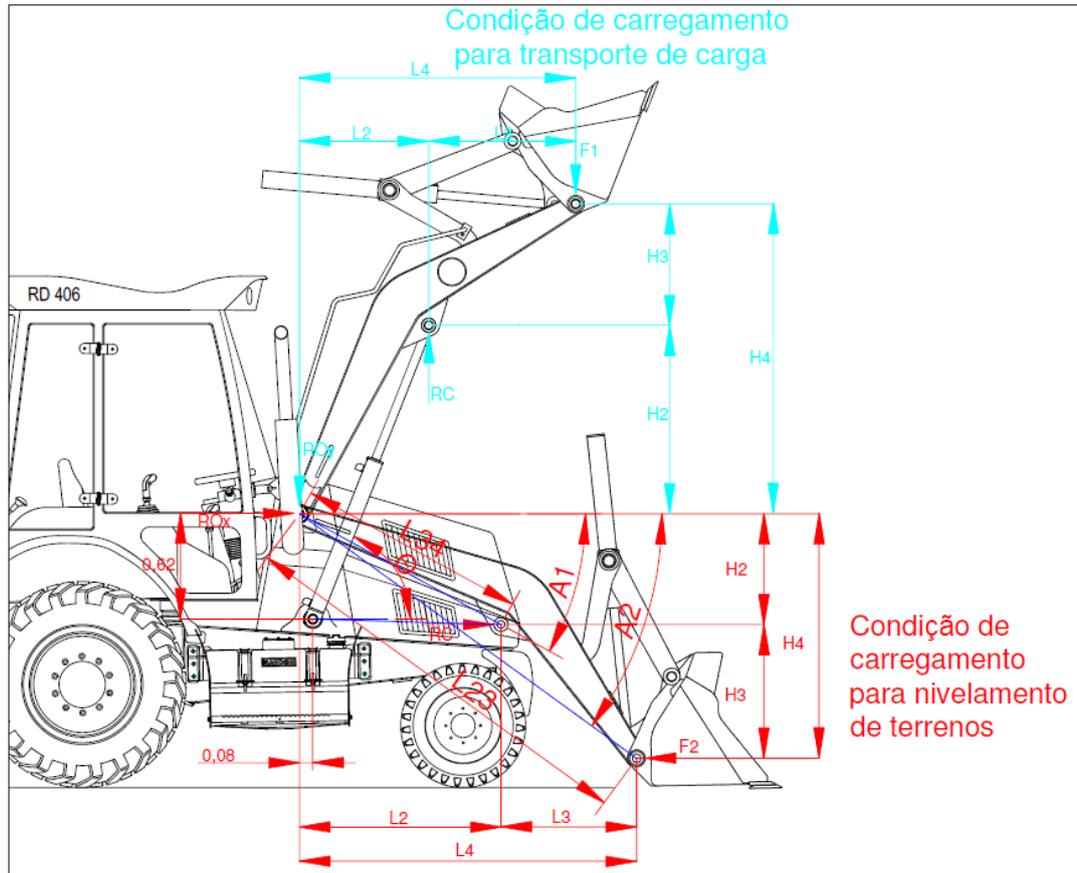
Para o processamento das análises utilizou-se uma análise estática linear. O processo de resolução foi realizado para as condições de transporte de materiais e nivelamento de terrenos.

3.4 CÁLCULOS ANALÍTICOS

Para a realização dos cálculos analíticos também foi considerado as duas condições mais comuns de trabalho: uma condição com transporte de cargas e outra para nivelamento de terrenos. Na condição de transporte o dado de entrada será a carga transportada pela concha dianteira através da equação 3.1 e na condição de nivelamento de terrenos será considerada a força de desagregação de materiais da retroescavadeira oriunda de seu sistema hidráulico. Com essas duas forças determinadas (F_1 e F_2), juntamente com os dados geométricos do braço será possível determinar as reações R_O e R_C , conforme apresentado na figura 13.

$$F_1 = \rho \cdot g \cdot V \quad (3.1)$$

Figura 13 - Geometria, forças e reações



Fonte: AUTOR (2014)

Para determinar as reações no cilindro e na origem primeiramente foram calculados os comprimentos $L4$, $L3$, $L2$, $H4$, $H3$ e $H2$ através das equações 3.2, 3.3, 3.4, 3.5, 3.6 e 3.7:

$$L4 = L24 \times \cos(A2) \quad (3.2)$$

$$L2 = L34 \times \cos(A1) \quad (3.3)$$

$$L3 = L4 - L2 \quad (3.4)$$

$$H4 = L24 \times \sin(A2) \quad (3.5)$$

$$H2 = L34 \times \sin(A1) \quad (3.6)$$

$$H4 = H3 - H2 \quad (3.7)$$

Buscando calcular as reações em todas as posições que o braço dianteiro possa ser solicitado foi variado os ângulos A1 e A2 de 1 em 1°, obtendo assim uma variação no ângulo θ que pode ser observado através da equação 3.8:

$$\theta = ATAN \frac{(H2+0,62)}{(L2-0,08)} \quad (3.8)$$

Na condição de nivelamento o braço dianteiro trabalhara sempre na mesma posição, porem quando o mesmo estiver transportando materiais ele tem seu ângulo θ variando, considerando essas condições acima, as reações no cilindro e na origem serão obtidas através das equações 3.9, 3.10, 3.11, 3.12, 3.13, e 3.14:

$$RCc = \frac{F1 \times L4}{(COS(\theta) \times H2) - (SEN(\theta) \times L2)} \quad (3.9)$$

$$ROXc = -RCc \times COS(\theta) \quad (3.10)$$

$$ROYc = -(F1) - (RCc \times SEN(\theta)) \quad (3.11)$$

$$RCn = \frac{-(F2 \times H4 \times (-1))}{(COS(\theta) \times H2 \times (-1)) + (SEN(\theta) \times L2)} \quad (3.12)$$

$$ROXn = -(F2) - (RCn \times COS(\theta)) \quad (3.13)$$

$$ROYn = -(RCn) \times (SEN(\theta)) \quad (3.14)$$

3.4.1 Cálculos de tensão

Após estes cálculos, o braço será seccionado conforme a figura 14, afim de se determinar propriedades da seção transversal, tais como, a área e o momento de inércia. Com o momento de inércia e a área determinados, é possível obter a tensão nesses pontos através das equações abaixo.

$$\sigma_{x'} = \frac{M.y}{I} \quad (3.15)$$

$$\sigma_{x''} = \frac{Fn}{A} \quad (3.16)$$

$$\tau_x = \frac{Fc}{A} \quad (3.17)$$

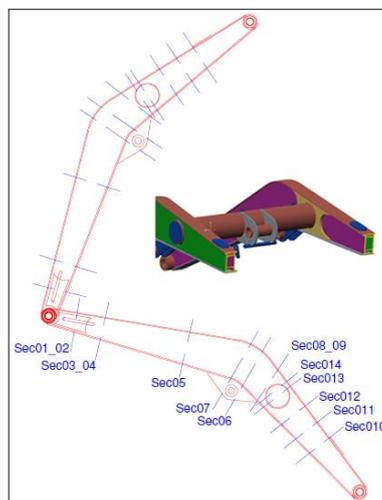
Após calcular todas essas tensões devido ao momento, devido a força cortante e devido a força normal, soma-se as tensões $\sigma_{x'}$ + $\sigma_{x''}$ conforme equação 3.18, obtendo assim a tensão máxima analítica em cada uma das seções com exceção da seção 5. Nesta seção o ponto instrumentado situa-se na linha neutra de flexão, onde atuam apenas as tensões devido à carga axial e ao cisalhamento, conforme equação 3.19. Caso a tensão encontrada em cada uma das seções multiplicada pelo coeficiente de segurança seja menor que a tensão de escoamento do material será considerado que o braço está aprovado analiticamente, conforme equação 3.20. Para o desenvolvimento deste trabalho será considerado fator 2,5 como coeficiente de segurança.

$$\sigma_{seções} = \sigma_{x'} + \sigma_{x''} \quad (3.18)$$

$$\sigma_{seção5} = \sqrt{\sigma_{x''}^2 + 3 \cdot \tau_x^2} \quad (3.19)$$

$$\sigma_{seções} \times CS < \sigma_{Esc} \quad (3.20)$$

Figura 14 - Braço seccionado

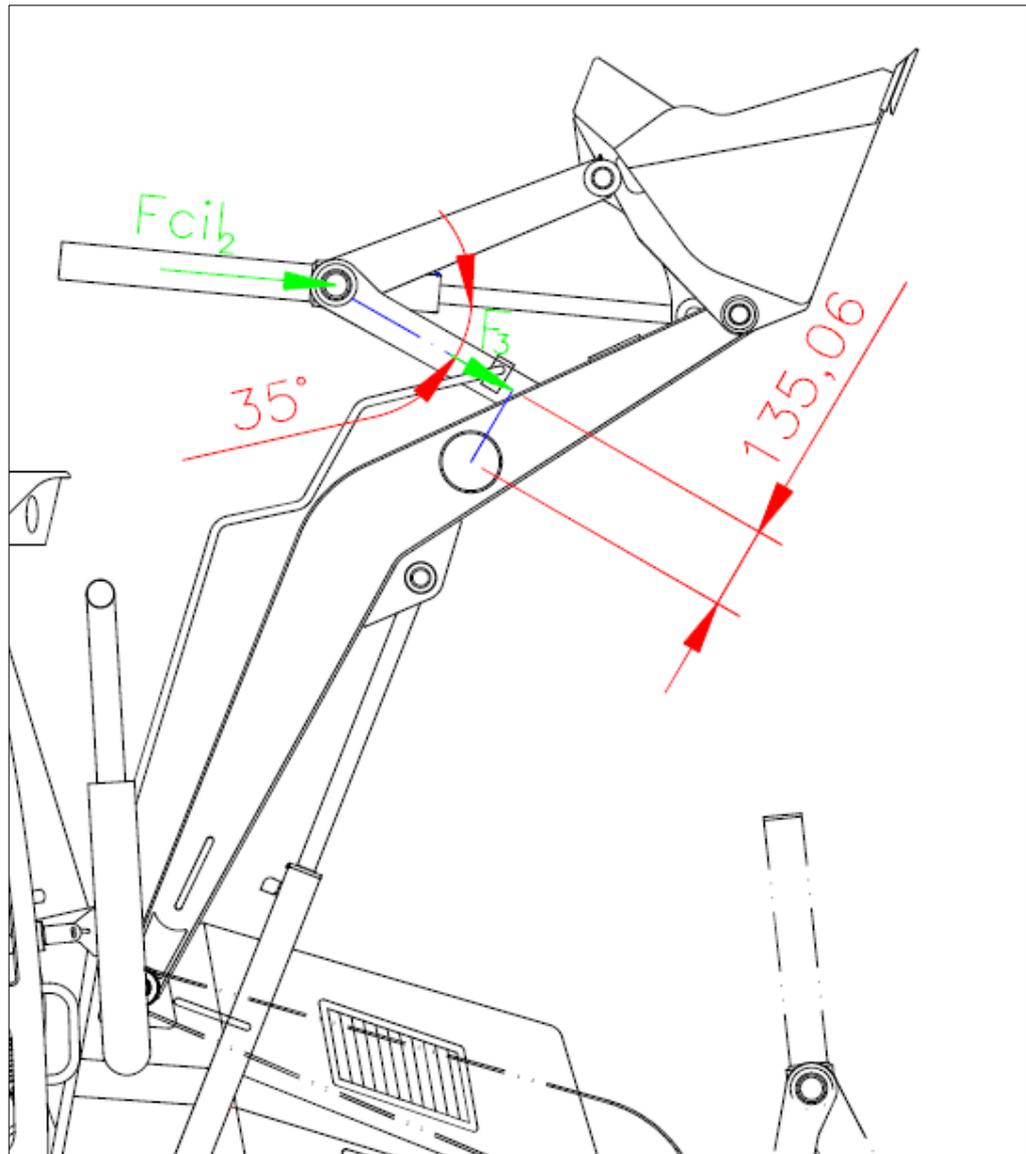


Fonte: AUTOR (2014)

3.4.2 Cálculos de torção e flexão no tubo

Foi determinada a tensão de von Mises do tubo central do braço dianteiro através da decomposição de forças e da geometria do mesmo conforme figura 15.

Figura 15 - Forças e geometria



Fonte: AUTOR (2014)

Num primeiro momento foi calculada a força do cilindro e sua componente que atua no tubo conforme as equações 3.21 e 3.22, após os cálculos de força foi determinado o Momento, conforme equações 3.23 e 3.24, e feito o cálculo de tensão com ambos o momentos pra verificar qual deles tem mais impacto estrutural no tubo.

$$F_{cil_2} = P \times Acil \quad (3.21)$$

$$F_3 = F_{cil} \times \cos 35^\circ \quad (3.22)$$

$$M = \frac{F \cdot a \cdot b^2}{L} \quad (3.23)$$

$$Mfa = \frac{-Fb^2}{L} [X(3a + b) - aL] \quad (3.24)$$

Com as definições acima foi realizado o cálculo da tensão de von Mises (equação 3.30) através das equações 3.25, 3.26, 3.27, 3.28 e 3.29:

$$\tau = \frac{T \cdot c}{J} \quad (3.25)$$

$$T = F_3 \times d \quad (3.26)$$

$$J = \frac{\pi}{2} \times (R_e^4 - R_i^4) \quad (3.27)$$

$$\sigma_5 = \frac{M_{tb} \cdot y_{tb}}{I_{tb}} \quad (3.28)$$

$$I_{tb} = \frac{\pi}{4} \times (R_e^4 - R_i^4) \quad (3.29)$$

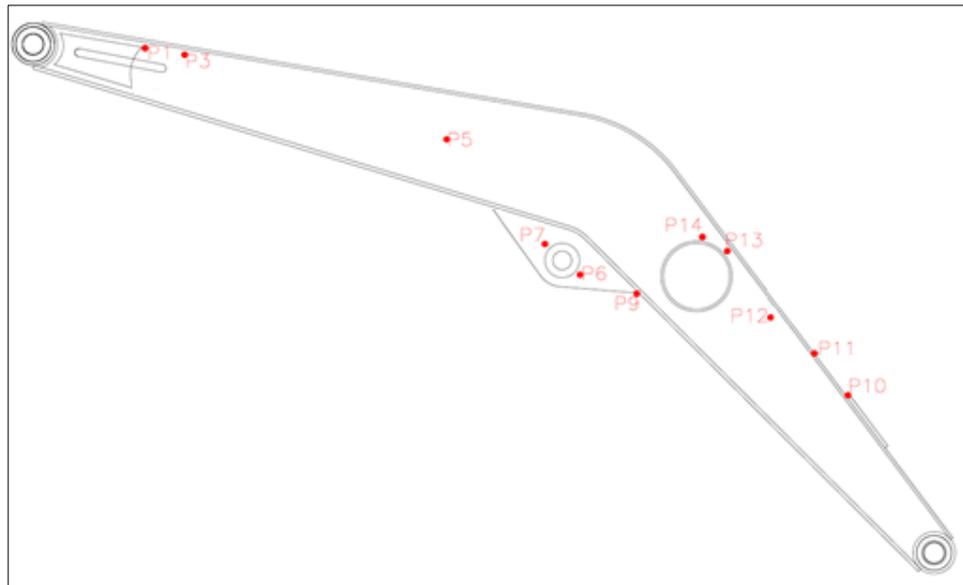
$$\sigma' = \sqrt{\sigma_5^2 + 3 \cdot \tau^2} \quad (3.30)$$

3.5 DADOS EXPERIMENTAIS

Foi realizada a coleta de dados do braço dianteiro em quatorze pontos conforme figura 16, os pontos estão localizados na mesma linha das seções representada na figura 14, para verificar a distribuição de tensões no braço dianteiro quando o mesmo é submetido as suas principais condições de trabalho, esta instrumentação contou com Strain Gauge RY81-3/120 HBM conforme figura 17.

Os dados experimentais foram realizados pelo setor de engenharia experimental, estes testes foram realizados paralelamente a realização de meu trabalho e foram usados alguns dados desta coleta para fins comparativos com os cálculos analíticos e as análises de CAE.

Figura 16 - Pontos instrumentados



Fonte: AUTOR (2014)

Figura 17 - Strain Gauge nos pontos 6, 7 e 14



Fonte: AUTOR (2014)

4 ANÁLISE DOS RESULTADOS

Para a análise dos resultados foram realizadas três etapas: a validação do modelo numérico através de cálculos analíticos, simulações CAE e coleta de dados experimentais. Foram levados em conta os valores das tensões e deslocamentos.

4.1 RESULTADOS DAS ANÁLISES CAE

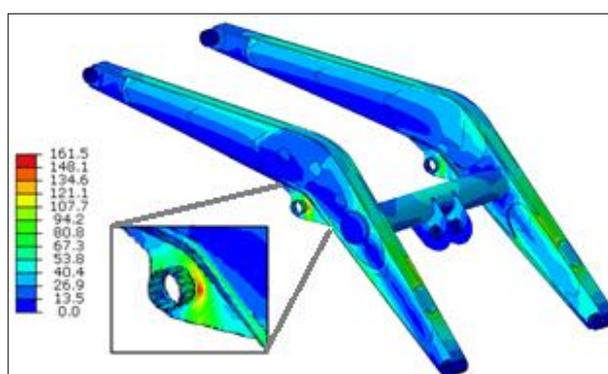
A análise CAE foi executada para as duas condições de trabalho da retroescavadeira, sendo elas a de nivelamento de terrenos e a de transporte de materiais.

4.1.1 Nivelamento de terrenos e transporte de materiais

Observou-se que as tensões obtidas tanto na condição de nivelamento de terrenos como na de transporte de materiais ficaram bem abaixo do limite de escoamento do material, que vale 1000 MPa. Em ambos os casos, os pontos de maior solicitação localizaram-se próximos a região onde é acoplado o cilindro de levantamento.

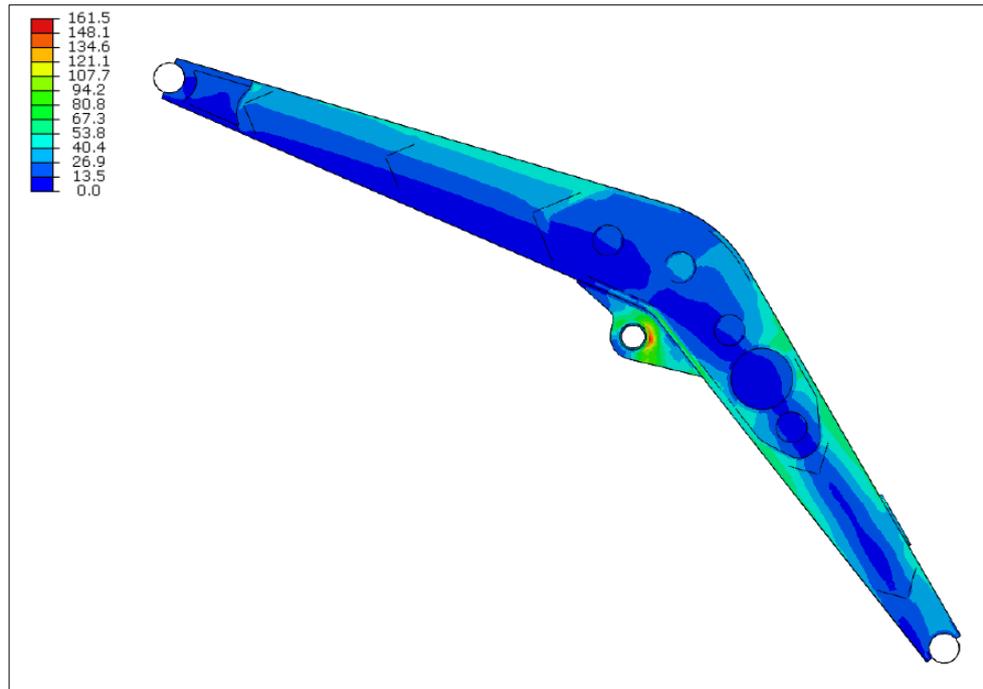
Nas figuras 18, 19 e 20 estão ilustradas as tensões equivalentes de von Mises na estrutura quando o braço é submetido a nivelamento de terrenos. Neste caso observou-se que a maior tensão resultante vale 161,5 MPa, o que resulta num coeficiente de segurança igual a 6,2. Este fator supera o mínimo estabelecido no item 3.4.1, indicando que a estrutura está validada por este critério.

Figura 18 - Vista 3D da análise CAE do braço na condição de nivelamento



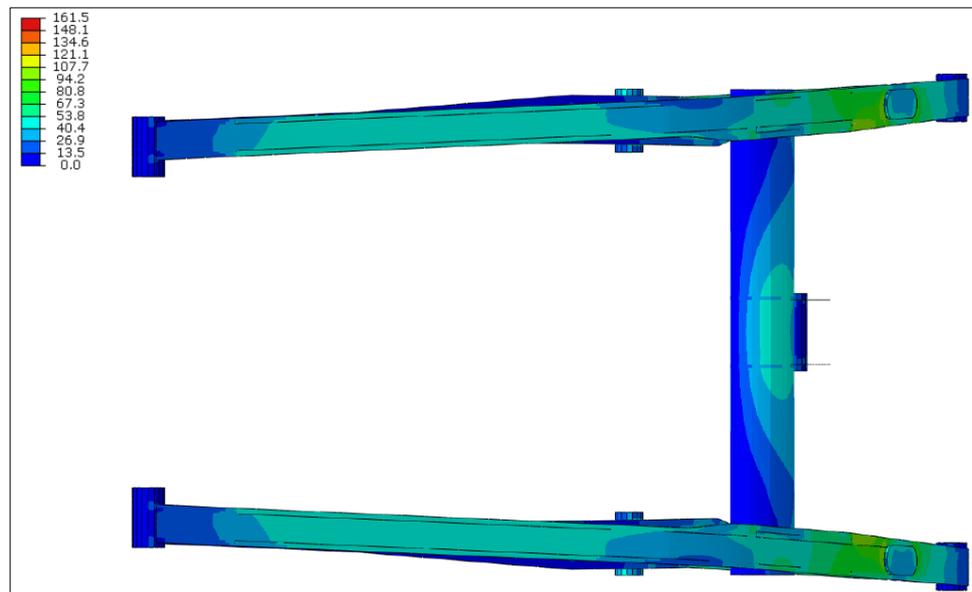
Fonte: AUTOR (2014)

Figura 19 - Vista lateral análise CAE do braço na condição de nivelamento



Fonte: AUTOR (2014)

Figura 20 - Vista superior mostrando a simetria na análise

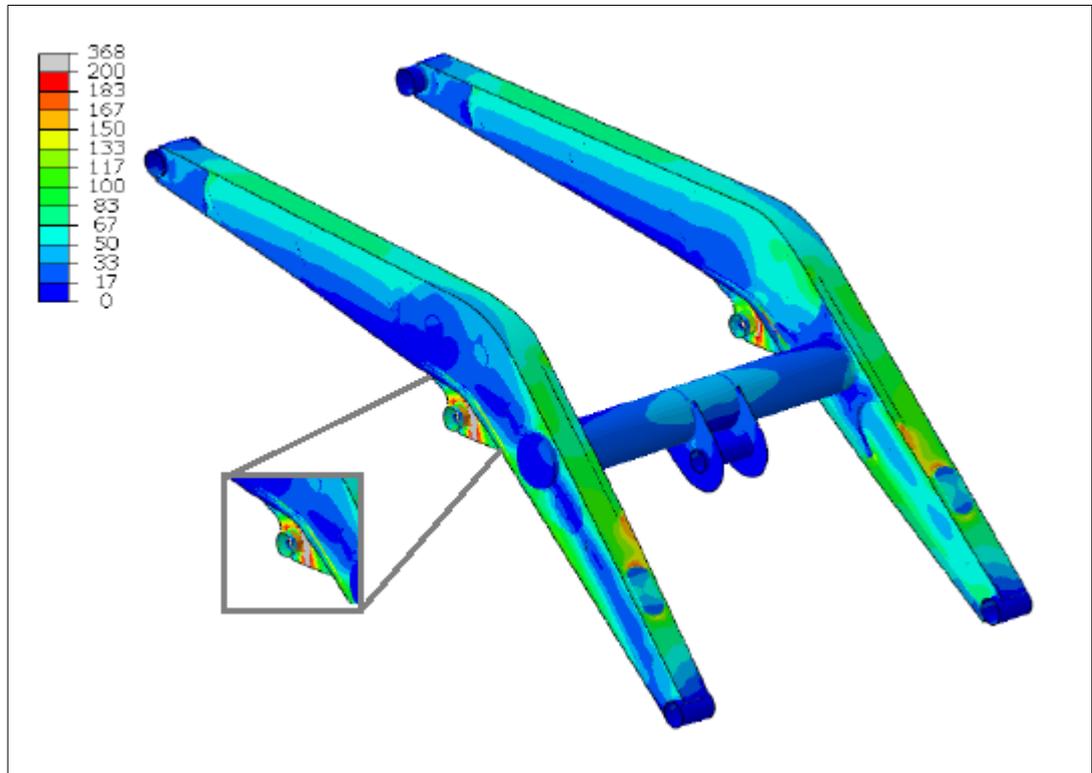


Fonte: AUTOR (2014)

Nas figuras 21, 22 e 23 estão ilustradas as tensões equivalente de von Mises na estrutura quando o braço é submetido a transporte de materiais. Neste caso observou-se que a maior tensão resultante vale 368 MPa, o que resulta num

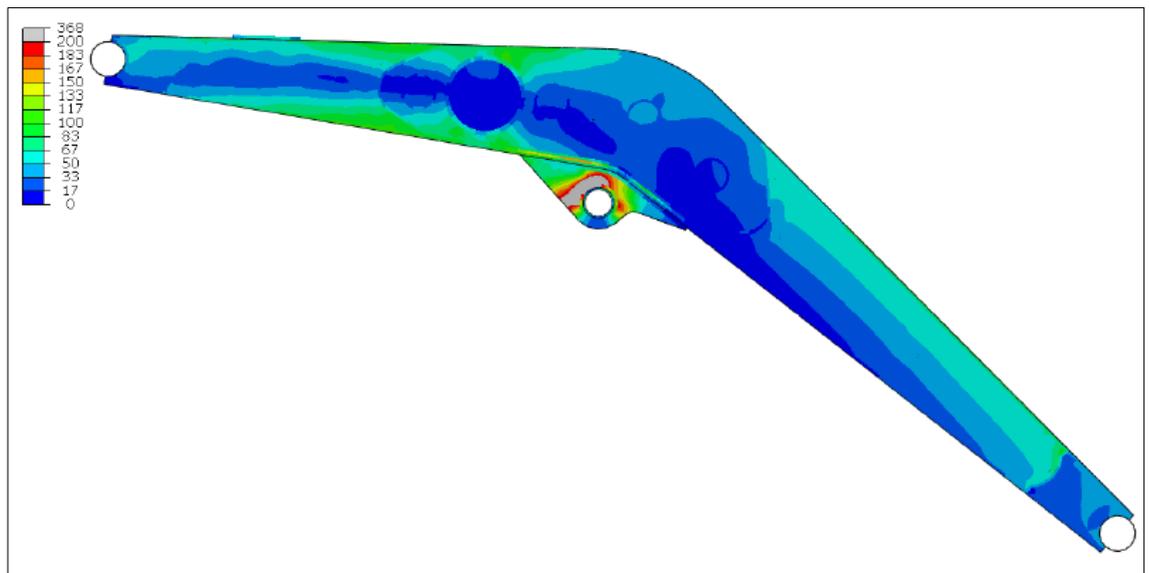
coeficiente de segurança igual a 2,7. Este fator supera o mínimo estabelecido no item 3.4.1, indicando que a estrutura está validada por este critério.

Figura 21 - Vista 3D da análise CAE do braço na condição de transporte



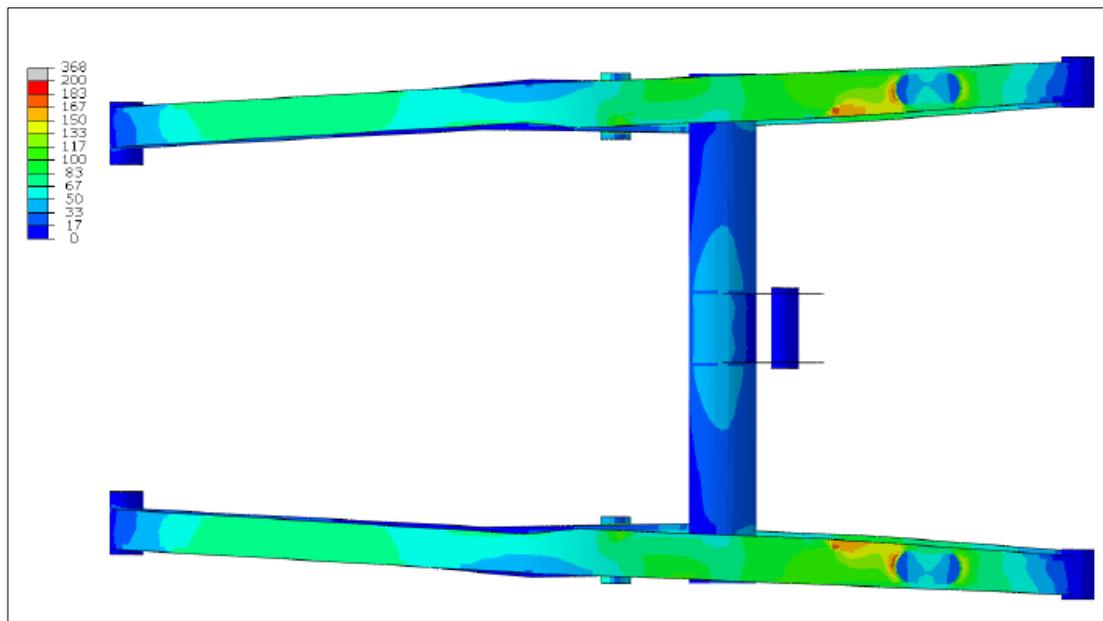
Fonte: AUTOR (2014)

Figura 22 - Vista lateral análise CAE do braço na condição de transporte



Fonte: AUTOR (2014)

Figura 23 - Vista superior mostrando a simetria na análise



Fonte: AUTOR (2014)

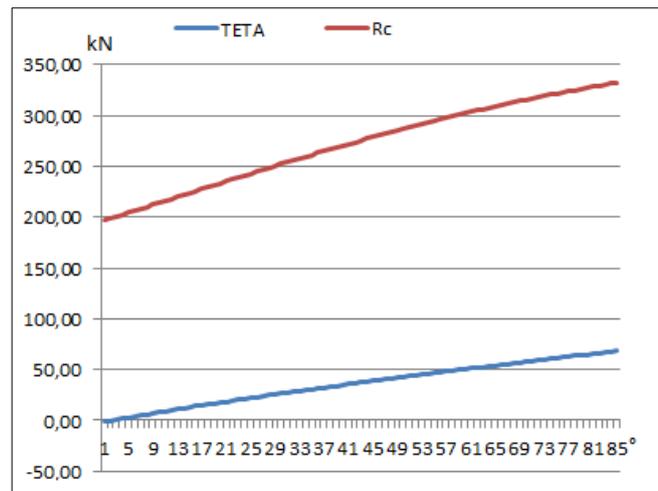
4.2 CÁLCULOS ANALÍTICOS

Num primeiro momento foi calculada a variação do posicionamento do braço, numa taxa de 1° para o ângulo θ , começando com o braço na posição de nivelamento até a posição de transporte de materiais.

Buscando calcular as reações em todas as posições que o braço dianteiro possa ser solicitado também foram variados os ângulos $A1$ e $A2$ numa taxa de 1° , obtendo assim uma variação no ângulo θ .

Na condição de nivelamento o braço dianteiro trabalhara sempre na mesma posição, porém quando o mesmo estiver transportando materiais ele tem seu ângulo θ variando. Considerando as condições acima, as reações no cilindro e na origem foram obtidas analiticamente. A figura 24 mostra o resultado dos cálculos das reações no cilindro, devido à variação do ângulo na condição de transporte de materiais.

Figura 24 - Reação no cilindro devido à variação do ângulo



Fonte: AUTOR (2014)

Com os cálculos das reações finalizados verificou-se que há uma relação direta entre o ângulo θ e a carga suportada pelo braço. Sendo assim, verifica-se que o caso mais crítico se dá quando o braço dianteiro está posicionado no seu limite superior.

Após estes cálculos, o braço foi seccionado, afim de se determinar propriedades da seção transversal, tais como, a área, distancia do centro até o extremidade e o momento de inércia. A figura 25 mostra a seção 9 com suas propriedades.

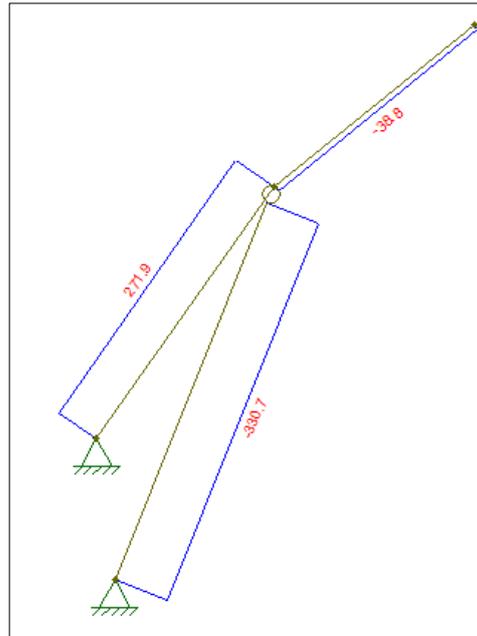
Figura 25 - Propriedades da seção 9



Fonte: AUTOR (2014)

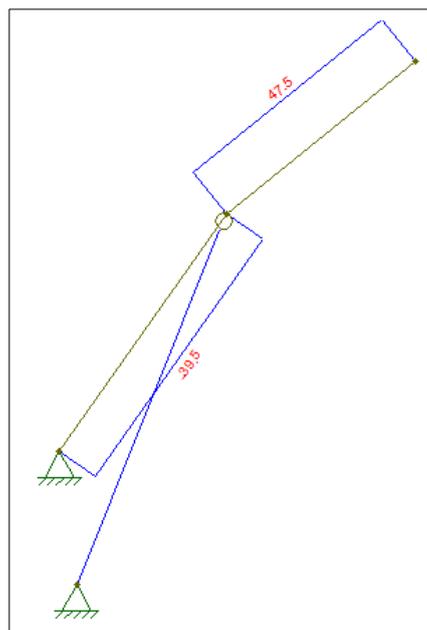
O momento de inércia, a força cortante e a força normal foram determinados pelo *software* Ftool, tanto para a condição de nivelamento quanto para a condição de transporte de materiais. As figuras 26, 27, 28, 29, 30 e 31, ilustram os dados referidos acima.

Figura 26 - Força normal para condição de transporte de materiais



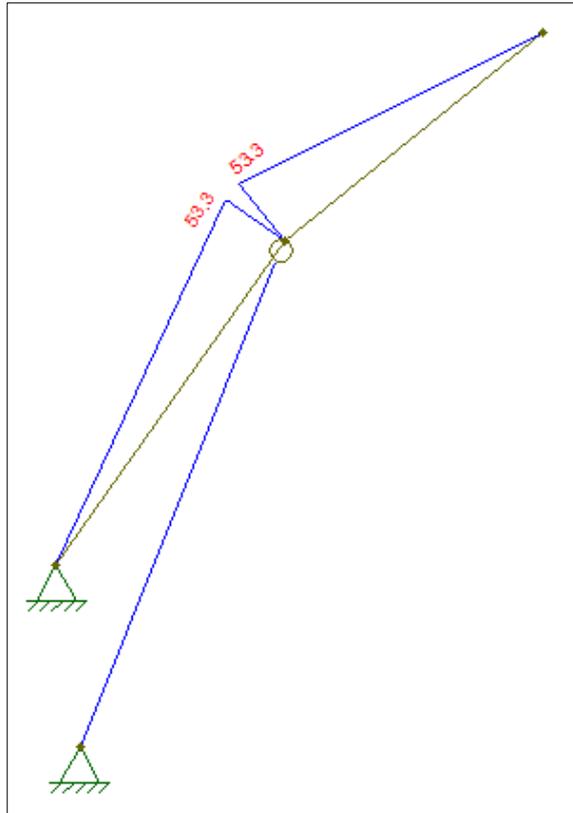
Fonte: AUTOR (2014)

Figura 27 - Força cortante para condição de transporte de materiais



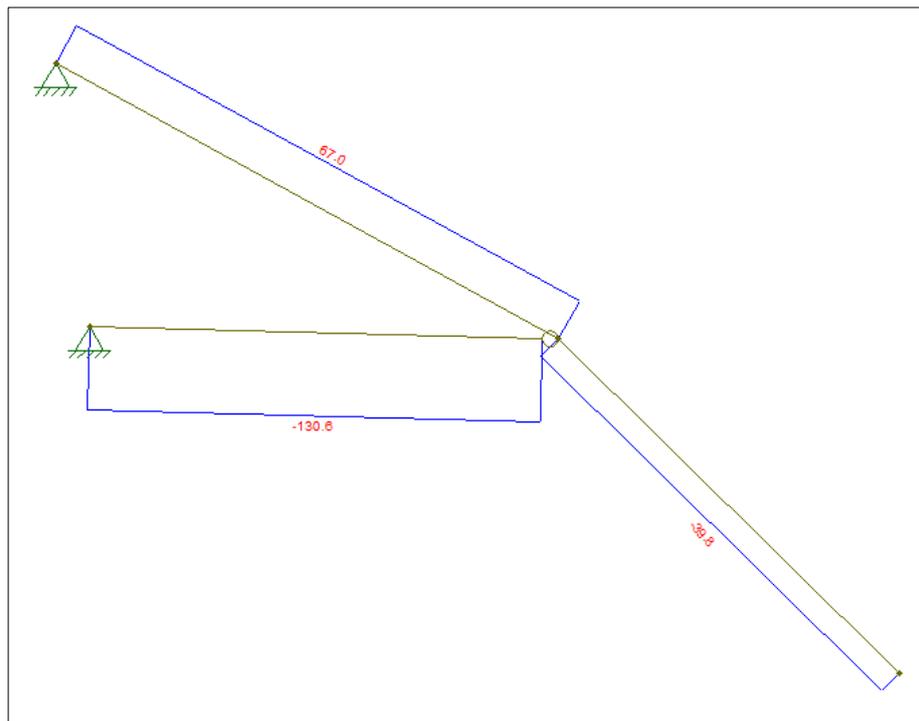
Fonte: AUTOR (2014)

Figura 28 - Momento para condição de transporte de materiais



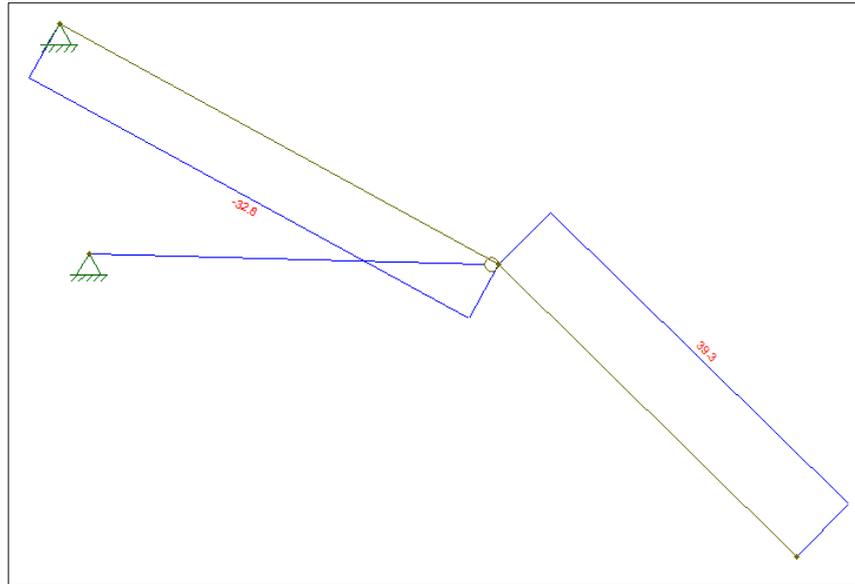
Fonte: AUTOR (2014)

Figura 29 - Força normal para condição de nivelamento de terrenos



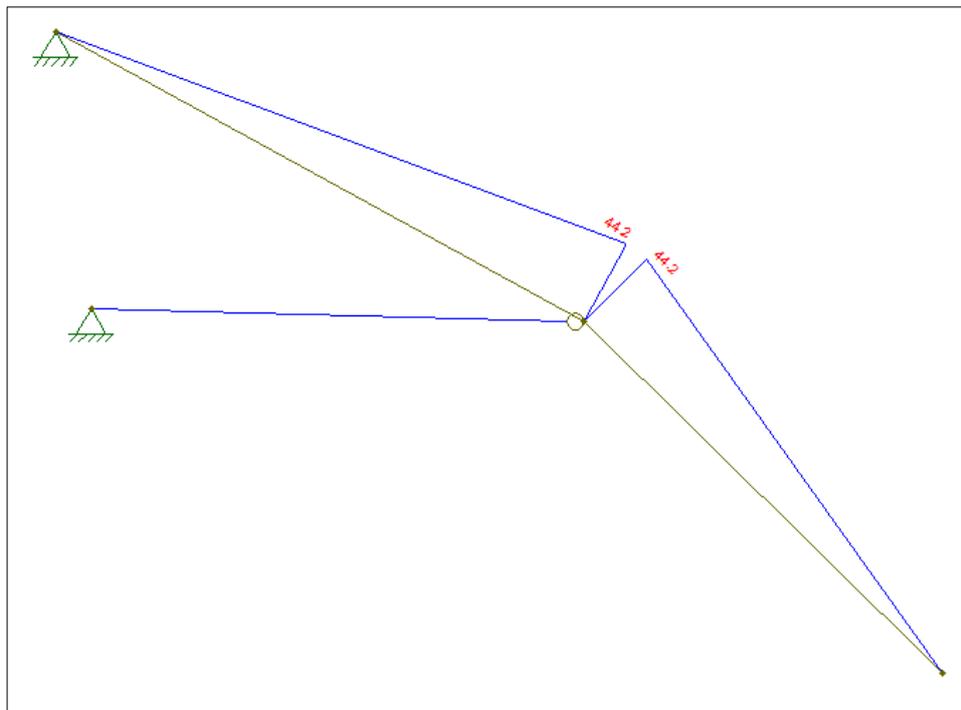
Fonte: AUTOR (2014)

Figura 30 - Força cortante para condição de nivelamento de terrenos



Fonte: AUTOR (2014)

Figura 31 - Momento para condição de nivelamento de terrenos



Fonte: AUTOR (2014)

Após a definição dos dados anteriores foram calculadas as tensões σ_{xI} , σ_{xII} e τ_x , obtendo assim a tensão para cada aplicação. A tabela 2 ilustra as tensões resultantes em cada seção do braço dianteiro conforme mostrado na figura 14, quando o mesmo é submetido a nivelamento de terrenos e transporte de

materiais. Neste caso observou-se que a maior tensão resultante vale 190,56 MPa, o que resulta num coeficiente de segurança igual a 5,25. Este fator supera o mínimo estabelecido no item 3.4.1, indicando que a estrutura está validada por este critério.

Tabela 2 - Tensões calculadas analiticamente

SEÇÕES	σ_{niv} (MPa)	σ_{tran} (MPa)
Sec01_2	54,41	90,41
Sec03_4	59,52	92,95
Sec05	17,36	55,50
Sec07	135,12	182,82
Sec06	158,67	190,56
Sec08_9	67,88	81,07
Sec10	97,83	115,46
Sec11	107,72	127,60
Sec12	94,15	111,67
Sec13	78,04	92,49
Sec14	69,08	82,41

Fonte: AUTOR (2014)

4.2.1 Cálculos no tubo

O dados de entrada para calcular a tensão no tubo foi a pressão do sistema hidráulico que é de 21 MPa e o diâmetro da camisa do cilindro que é de 90 mm com esses dois dados foram obtidos os seguintes resultados:

$$F_{cil_2} = 133,6 \text{ kN},$$

$$F_3 = 109,4 \text{ kN e}$$

$$\tau = 36,96 \text{ MPa}$$

Após os cálculos devido ao torque foi verificada a tensão devido ao momento, antes do cálculo da tensão foi verificada duas maneiras de calcular o momento, uma através da equação 3.23 e outra através da equação 3.24, porém em ambos os casos foi obtido o mesmo valor de momento, com base nisso o valor da tensão foi de:

$$\sigma_5 = 65,53 \text{ MPa}$$

Com as duas tensões encontradas foi calculada a tensão de von Mises no tubo e esta apresentou o resultado abaixo:

$$\sigma' = \sqrt{(65,32)^2 + 3 \cdot (36,96)^2} = 91,6 \text{ MPa}$$

Considerando que a tensão de von Mises resultante na estrutura do tubo é de 91,6 MPa, o que resulta num coeficiente de segurança igual a 10,9. Este fator supera o mínimo estabelecido no item 3.4.1, indicando que a estrutura está validada por este critério e que o tubo é pouco solicitado durante a aplicação.

4.3 DADOS EXPERIMENTAIS

Para a coleta de dados considerado duas condições de carregamentos. Na condição de nivelamento de terrenos foi simulado uma operação de nivelamento com uma parede de concreto assim utilizando a máxima força da máquina nessa operação. Na figura 32 pode-se observar como foi realizado o teste.

Figura 32 - Retro realizando operação de nivelamento com restrição



Fonte: AUTOR (2014)

Os resultados das tensões encontradas nesse teste podem ser verificados na figura 33.

Figura 33 - Coleta de dados para operação de nivelamento

Teste	Coleta		P1 E	P2 I	P3 E	P4 I	P5	P6
			$\mu\text{m/m}$	$\mu\text{m/m}$	$\mu\text{m/m}$	$\mu\text{m/m}$	$\mu\text{m/m}$	$\mu\text{m/m}$
Niv	01	Máx	-21,38	-5,033	259,11	275,38	99,61	-18,18
		Min	-261,38	-226,78	3,685	12,32	-18,23	-591,18
	02	Máx	-20,54	-1,342	266,41	277,09	95,99	-11,49
		Min	-260,54	-224,16	2,32	13,46	-12,38	-632,29
	03	Máx	-20,84	-2,075	266,65	287,92	89,93	-18,09
		Min	-250,84	-225,98	4,216	18,11	-9,625	-647,53
	Média	Máx	-20,92	-2,82	264,06	280,13	95,18	-15,92
		Min	-257,59	-225,64	3,41	14,63	-13,41	-623,67
	Tensão Máx (Mpa)			-4,3932	-0,5915	55,4519	58,83	19,9871
Tensão Min (Mpa)			-54,0932	-47,3844	0,71547	3,072	-2,81645	-130,97
P7	P8 E	P9 I	P10	P11	P12	P13	P14	
$\mu\text{m/m}$	$\mu\text{m/m}$	$\mu\text{m/m}$	$\mu\text{m/m}$	$\mu\text{m/m}$	$\mu\text{m/m}$	$\mu\text{m/m}$	$\mu\text{m/m}$	
-35,29	-4,808	-11,21	509,2	439,08	401,725	185,83	300,57	
-539,55	-354,28	-336,78	33,06	19,81	-142,41	-14,16	42,1	
-34,73	7,633	8,4	492,34	431,45	403,458	187,99	321,98	
-548,3	-378,73	-384,61	29,94	18,19	-142,08	-22,56	43,14	
-36,07	0,5833	-1,042	513,33	442,44	402,8	176,89	323,11	
-546,86	-379,69	-374,78	35,44	21,34	-148,97	-24,03	50,04	
-35,36	1,14	-1,28	504,96	437,66	402,66	183,57	315,22	
-544,90	-370,90	-365,39	32,81	19,78	-144,49	-20,25	45,09	
-7,4263	0,23858	-0,26964	106,0409	91,9079	84,5588	38,5497	66,1962	
-114,43	-77,889	-76,7319	6,8908	4,1538	-30,3422	-4,2525	9,4696	

Fonte: AUTOR (2014)

Após a coleta das condições de nivelamento foi realizada a coleta para a condição de transporte de materiais. Nesse teste foi carregado a caçamba com 1m³ de terra e então levantado seu braço do solo até a altura máxima permitida pela geometria da máquina, conforme figura 34.

Figura 34 - Retro em operação de transporte de materiais



Fonte: AUTOR (2014)

Os resultados das tensões encontradas nesse teste de transporte de materiais podem ser verificados na figura 35.

Figura 35 - Coleta de dados para operação de transporte de materiais

Teste	Coleta		P1E	P2I	P3E	P4I	P5	P6
			$\mu\text{m/m}$	$\mu\text{m/m}$	$\mu\text{m/m}$	$\mu\text{m/m}$	$\mu\text{m/m}$	$\mu\text{m/m}$
Trans	01	Máx	-30,38	-86,85	404,43	400,16	54,78	-188,83
		Min	-283,35	-301,83	70,3	64,88	14,23	-793,36
	02	Máx	-30,75	-71,56	402,49	403,26	58,18	-177,15
		Min	-286,13	-313,03	56,8	51,08	11,77	-811,31
	03	Máx	-25,63	-26,43	406,55	402,56	54,9	-134,02
		Min	-295,23	-314,92	11,23	42,59	7,142	-820,38
	Média	Máx	-28,92	-61,61	404,49	401,99	55,95	-166,67
		Min	-288,24	-309,93	46,11	52,85	11,05	-808,35
Tensão Máx (Mpa)			-6,0732	-12,9388	84,9429	84,42	11,7502	-35
Tensão Min (Mpa)			-60,5297	-65,0846	9,6831	11,1	2,31994	-169,754
P7	P8 E	P9 I	P10	P11	P12	P13	P14	
$\mu\text{m/m}$	$\mu\text{m/m}$	$\mu\text{m/m}$	$\mu\text{m/m}$	$\mu\text{m/m}$	$\mu\text{m/m}$	$\mu\text{m/m}$	$\mu\text{m/m}$	
-80,54	-101,73	-121,99	711,41	594,4	557,36	531,61	527,65	
-800,45	-435,2	-447,38	210,42	110,38	-54,97	20,51	107,74	
-74,55	-105,98	-102,6	687,67	582,81	552,03	532,24	521,2	
-800,08	-434,77	-442,23	170,63	90,69	-50,92	13,21	96,62	
-44,23	-10,07	61,78	698,21	589,49	553,28	538,12	525,16	
-800,7	-443,27	-458,73	143,19	77,92	-54,85	-108,49	72,45	
-66,44	-72,59	-54,27	699,10	588,90	554,22	533,99	524,67	
-800,41	-437,75	-449,45	174,75	93,00	-53,58	-24,92	92,27	
-13,9524	-15,2446	-11,3967	146,8103	123,669	116,387	112,138	110,181	
-168,086	-91,9268	-94,3838	36,6968	19,5293	-11,2518	-5,2339	19,3767	

Fonte: AUTOR (2014)

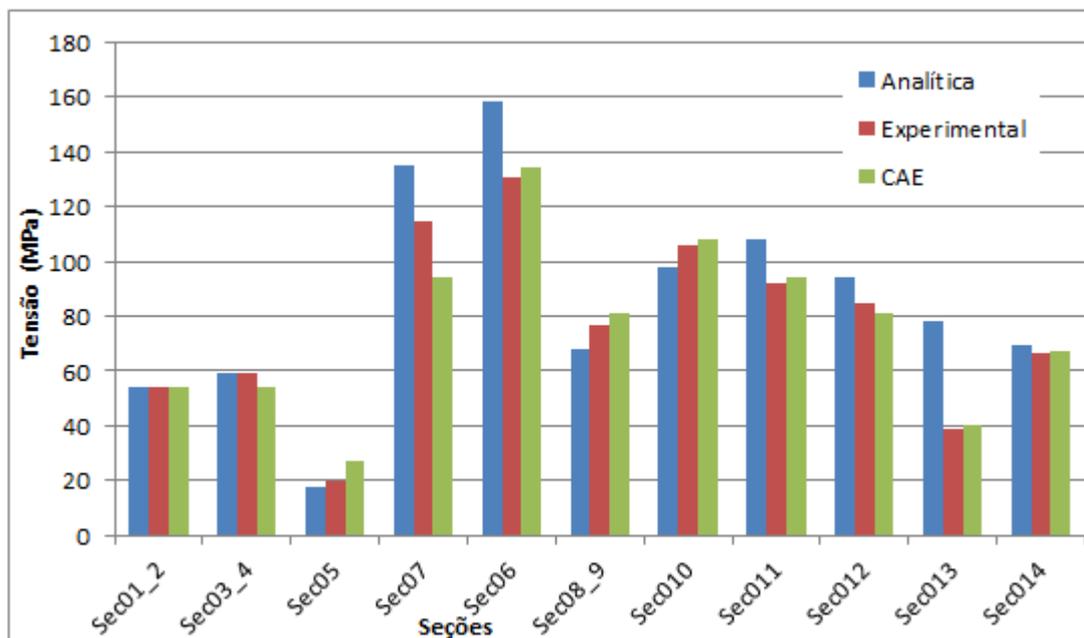
Os pontos coletados são os que estão representados na figura 16, sendo que os pontos 2, 4 e 9 estão localizados na mesma posição dos pontos 1, 3 e 8 respectivamente, porém os pontos 1, 3 e 8 estão localizados na parte externa assim como os demais pontos mostrados na figura 16, já os pontos 2, 4 e 9 estão localizados na parte interna do braço.

4.4 RESULTADOS E DISCUSSÕES

Como um dos objetivos deste trabalho é a comparação de resultados das análises desenvolvidas, na sequência estão apresentados de forma gráfica os resultados obtidos nos cálculos analíticos, pelo método dos elementos finitos e nos ensaios experimentais. Cada ponto do gráfico corresponde à tensão obtida nas seções analisadas do braço da retroescavadeira.

A figura 36 ilustra os resultados de tensões obtidos para a condição de nivelamento de terrenos. Os resultados obtidos pelo método dos elementos finitos resultaram em tensões similares às obtidas experimentalmente. Os resultados obtidos nos cálculos analíticos seguem uma curva semelhante a dos outros dois métodos, porém com uma grande discrepância na seção Sec013. A seção Sec013 foi tratada como uma viga “I” vazada, ou seja, considerando que há um furo de diâmetro 170 mm na sua alma. Tal fato é verdadeiro, mas foi desconsiderado no cálculo analítico de tensões que neste furo está inserido o tubo transversal que faz a ligação dos dois braços da retroescavadeira. Este tubo certamente terá influência positiva na resistência do braço nesta região, o que reduziria a tensão encontrada, aproximando-a das obtidas nos outros dois métodos.

Figura 36 - Gráfico comparativo de tensões para nivelamento de terrenos

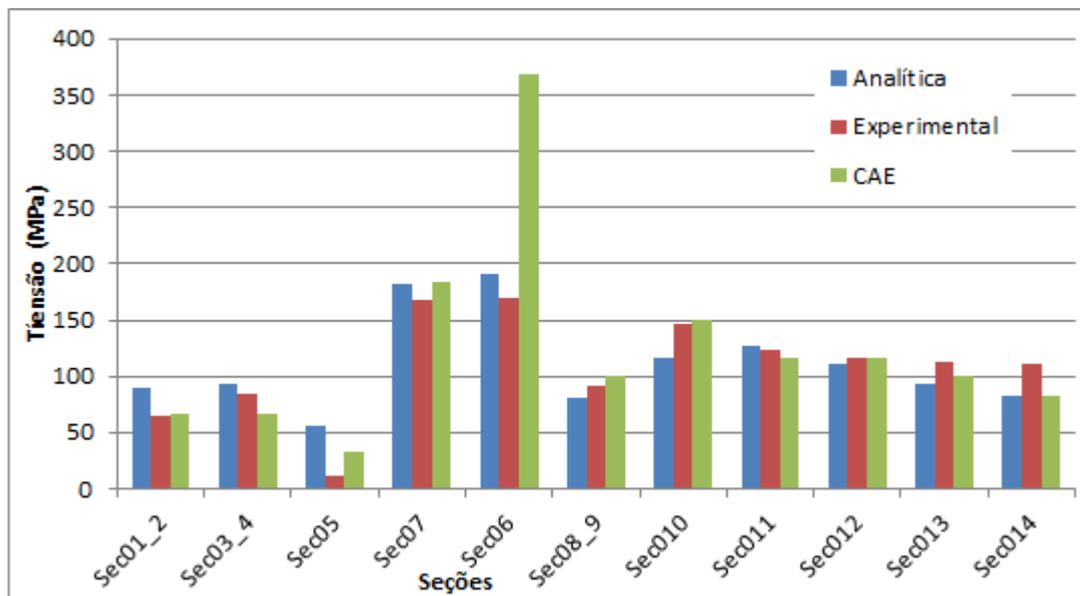


Fonte: AUTOR (2014)

A figura 37 ilustra os resultados de tensões obtidos para a condição de transporte de materiais. Neste caso, tanto os resultados analíticos quanto pelo método dos elementos finitos apresentaram grande similaridade com as tensões obtidas experimentalmente. A seção Sec05 apresentou uma divergência nos resultados analíticos, porém esse fato aconteceu por que nesta região o braço possui um reforço estrutural soldado na sua parte interna, local este onde foi instrumentado o braço para a coleta do dado experimental. Além disso, a seção

Sec06 apresentou um resultado destoante na análise de elementos finitos, em relação aos demais. Neste caso, percebe-se a partir da figura 22, que a região em questão possui uma variada faixa de valores de tensão devido às suas características geométricas que promovem concentrações de tensão, além da proximidade do ponto de aplicação de carga. Tal fato poderia explicar a diferença observada entre o pico de tensão obtido numericamente e o resultado experimental.

Figura 37 - Gráfico comparativo de tensões para transporte de materiais



Fonte: AUTOR (2014)

5 CONCLUSÃO

As retroescavadeiras são equipamentos projetados para aplicações severas de trabalho. O braço dianteiro, objeto de estudo deste trabalho de conclusão, é a parte responsável por nivelamento de terrenos e transporte de materiais.

Com base nas análises desenvolvidas ficou evidenciado que o braço não irá apresentar problemas estruturais quando sujeito às suas principais condições de trabalho. Este resultado já era esperado pois o produto está no mercado há cerca de 12 anos e nunca apresentou falha em campo. Os pontos de maior tensão localizaram-se no entorno dos mancais onde são montados os cilindros hidráulicos responsáveis pela elevação do conjunto. Isto mostra que tal região pode ser crítica caso o braço seja levado a uma condição de trabalho incomum.

Os cálculos analíticos mostraram resultados semelhantes aos obtidos na análise de elementos finitos e ambos se aproximaram aos obtidos experimentalmente, sendo este considerado uma referência para validação dos resultados dos dois primeiros.

Comparativamente, os resultados obtidos pelo método dos elementos finitos tiveram uma variação média de 7,9% com relação aos resultados experimentais. Da mesma forma, os resultados analíticos apresentaram uma variação média de 11,8%. Ao todo, dois dos 22 pontos analisados apresentaram resultados analíticos de tensões que diferiram fortemente dos resultados obtidos nos outros dois métodos, chegando a uma diferença máxima de quase 5 vezes. A análise computacional também resultou em dois pontos de distorção, apresentando uma diferença máxima de quase 3 vezes o valor obtido experimentalmente. Tais pontos não foram considerados no cálculo que determinou a variação média entre os métodos apresentada anteriormente.

De forma mais específica, observa-se que as seções 5 e 13 correspondem a pontos onde há variação geométrica, já a seção 6 corresponde a uma região onde há concentradores de tensão, o que poderia justificar as distorções observadas.

Também é possível considerar que este trabalho é importante para a empresa Randon Veículos, pois além de fornecer informações sobre o projeto deste veículo, poderá ser útil para projetos futuros. O processo de análise detalhado e executado neste trabalho poderá ser utilizado como base em novas aplicações desta linha de produto e em outros projetos estruturais.

Por fim, Este trabalho demonstra que novas geometrias propostas para o braço dianteiro podem ser rapidamente analisadas com base em cálculos analíticos de tensões. Tal processo agilizaria as etapas intermediárias de análise que demandariam um grande tempo computacional no caso do método de elementos finitos ou tempo e custos de instrumentação nos casos experimentais.

6 CONSIDERAÇÕES FINAIS

- Realizar análise dinâmica do braço dianteiro;
- Repetir os cálculos realizados nesse trabalho, porém com outra geometria de braço, com objetivo de otimizar o mesmo.

BIBLIOGRAFIA

- ADAMS, V.; ASKKENAZI, A. **Building Better Products with Finite Element Analysis**. Santa Fe, NM, USA. 1999. 393p. Library of Congress Cataloging-in-Publication OnWorld Press.
- ALVES F^o, A. **Elementos Finitos: A base da tecnologia CAE**. São Paulo: Érica, 2006.
- ALVES F^o, A. **Elementos Finitos: A base da tecnologia CAE**. 5. ed. São Paulo: Érica, 2007. 294 p. ISBN 97887571947412.
- ANDRADE, E. J. S. D. **Modelação e análise estática e dinâmica em componentes estruturais de um automóvel de competição**. Portugal. 2011. 111 p. Dissertação de mestrado - Universidade do Minho, Escola de engenharia.
- AZEVEDO, A. F. M. Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto. **Método dos elementos finitos**, 2003. Disponível em: <www.fe.up.pt/~alvaro>. Acesso em: 04 abr. 2013.
- BAADKAR, C. C. **Semi-Trailer Structural Failure Analysis Using Finite Element Method**. Nova Zelândia. 2010. 130 p. Dissertação de mestrado - Universidade de Canterbury.
- BOŠNJAK, S.; ZRNIC, N.; SIMONOVIC, A.; MOMCILOVIC D. Failure analysis of the end eye connection of the bucket wheel excavator portal tie-rod support. **Engineering Failure Analysis**, Belgrado, Sérvia, p. 740-750, 2008.
- FAGAN, M. J. **Finite Element Analysis - Theory and Practice**. USA, 1992.
- FEODOSIEV, V. I. **Resistência de Materiais**. Moscou: Editorial MIR, 1980.
- HIBBELER, R. C. **Resistência dos materiais**. 5. ed. São Paulo: Pearson Prentice Hall, 2004. 670 p. ISBN 8587918672.
- INGOLE, N. K.; BHOPE, D. V. Stress analysis of tractor trailer chassis for self weight reduction. **International Journal of Engineering Science and Technology**, Chandrapur, Maharashtra, India, 2011. p. 7218-7225.
- JUBER H. Q. and MANISH S. (2012), "The Finite Element Analysis of Boom of Backhoe Loader", **International Journal of Engineering Research and applications** (IJERA), ISSN: 2248-9622
- NORTON, R. L. **Projeto de máquinas: uma abordagem integrada**. 2. ed. Porto Alegre: Bookman, 2004. 931 p. ISBN 9788536302737.

- OLIVEIRA, F. C. G. D. **Contribuição ao desenvolvimento de uma estrutura veicular tipo spaceframe usando método dos elementos finitos e métodos heurísticos**. Uberlândia. 2007. 130 p. Dissertação de mestrado - Universidade Federal de Uberlândia.
- PANCERI R. A. **Análise de tensões atuantes no munhão interno do jipe militar marruá através do critério estático exigido pelo exército**. Caxias do Sul. 2004. Trabalho de Conclusão de Curso. Universidade de Caxias do Sul.
- PINTO Fº, R. R. **Concepção, projeto e otimização de uma estrutura para a aplicação em um veículo de uso misto**. Uberlândia. 2004. 176 p. Dissertação de mestrado - Universidade Federal de Uberlândia.
- RUSIŃSKI, E.; MOCZKO, P.; CZMOCHOWSKI, J. Numerical and experimental analysis of a mine's loader boom crack. **Automation in Construction**, Wroclaw, Polônia, 2008. p. 271-277.
- SHIGLEY, J. E.; MISCHKE, C. R.; BUDYNAS, R. G. **Projeto de engenharia mecânica**. 7. ed. Porto Alegre: Bookman, 2005. 960 p. ISBN 8536305622.
- SOARES, F. S.; GERTZ, L. C.; CERVIERI, A.; AIRES, A. F. R.; SILVEIRA M. A. Desenvolvimento de um chassi automotivo para um veículo elétrico de pequeno porte. **Revista de Iniciação científica da Ulbra**, n. 10, 2012.
- TIMOSHENKO, S. P.; GERE, J. E. **Mecânica dos Sólidos**. Rio de Janeiro: LTC, 1994.
- WYART, E.; COULON, D.; PARDOEN, T.; REMACLE, J.F.; LANI, F. **Application of the substructured finite element/extend finite element method (S-FE/XFE) to the analysis of cracks in aircraft thin walled structures**. [S.l.: s.n.], 2008.
- ZIENKIEWICZ, O.C.; TAYLOR, R.L.; ZHU, J.Z. **The Finite Element Method: Its Basis and Fundamentals**. [S.l.: s.n.], 2005.

ANEXO

ANEXO A – RELATÓRIO DE PROPRIEDADES MECÂNICAS

USIMINAS SIDERÚRGICAS DE MINAS GERAIS S.A.										CERTIFICADO DE INSPEÇÃO			Cliente-Customer: IMPLIMENTOS AGRICOLAS JAN S/A					
USINA INTENDENTE CÂMARA - PATINGAMGIBRASIL										INSPECTION CERTIFICATE			Tolerâncias - Tolerances					
SEDE: BELO HORIZONTE - MINAS GERAIS										CHAPA GROSSA DO LCO			Espessura-Thickness					
BARRIO ENGENHO NOBLENZA - CP 806 - CEP: 31910-280										STEEL PLATE			Comprimento-Length					
CNPJ: 09.784.730/0023-42										1250 X 2000 X 6000 mm			-0,25/+0,76 mm					
MOSCAVO ESTADUAL: 513.00202.0120										Dimensões Nominais - Nominal Dimensions			-0,00/+180,00mm					
A Usiminas certifica que os produtos descritos foram fabricados pelo processo de aquecimento a vácuo com atenuação térmica aplicada. A Usiminas disponibiliza, através do endereço eletrônico http://www.usiminas.com.br/verificar-certificacao , uma ferramenta de verificação de autenticidade dos certificados de seus produtos. Para sua segurança, recomendamos a utilização desse recurso. Usiminas certifies that the products herein described have been produced by using the basic oxygen process (LD). Tested and analyzed according to the applicable technical specifications. Usiminas makes available, by using the following website: http://www.usiminas.com.br/verificar-certificacao , a tool to be used by the customer to verify (check) product certification authenticity. Usiminas also recommends the use of such tool for customer's safety.										Bordas - Edge / Oleamento - Oiled			Folha - Sheet = 1					
USIM-AR400										NAO APARADA E NAO OLEADA			SUPERFICIE COMERCIAL					
Qualidade - Steel										MILL EDGE AND DRY			COMERCIAL SURFACE					
Placa Volume										Pecas por Volume			Peso Líquido			Corrida Amostra		
Slab										Pecas por Packages			Net Weight			Heat		
321										816936959+			1280			589047		
Peso Líquido Real Total-Actual Net Weight = 1,280 Tonelagem Métrica-Metric Ton										Peso Bruto Gross Weight			Peso Líquido			Corrida Amostra		
Peso Bruto Real Total-Actual Gross Weight = 1,280 Tonelagem Métrica-Metric Ton										Pecas-Pieces = 1			Volumes = 1			Heat		
Ensaio de Tração - Tensile Test										Ensaio de Dureza - Hardness Test			Ensaio de Dobramento - Bend Test			Corrida Amostra		
Amostra For Dir IE IR IE/IR(%) Al(%)										Amostra For Dureza			Amostra For Dir Obtido			Corrida Amostra		
Sample VS TS VS/TS E1										Sample Hardness			Sample Obtained			Heat		
41834780 B4 C 974 1089 92 20,0										41834809 B4 388			41834780 B4 L BOK			589047		
Unidade-Unit = MPa										Tipo de Dureza-Hardness Type = Brinell (3T)			Ángulo-Angle = 180°			589047		
EM = 50 mm Larg = 25 mm g = Retangular													Labor-Type = Normal			Heat		
Valores apenas indicativos-Indicative values only													Diámetro do Pino-Diameter of Mandril = 9,0 Esp			589047		
													Valores apenas indicativos-Indicative values only			Heat		
Ensaio de Charpy - Charpy Test													Sistema de Gestão			Heat		
Amostra For Dir Temp EAI EAZ EAS EAM													Certificado pelas normas:			589047		
Sample AEL AER AER AEM													Management System Approved			Heat		
41834780 B4 L -40 98 83 105 82													By the Following Standard:			589047		
Unidade-Unit = Joule													ISO 9001			Heat		
Unidade de Temperatura-Temperature Unit = °C													ISO 14001			Heat		
Ensaio em V com Zmm de Profundidade-V notch with Zmm													ISO/TS 16949			Heat		
Direção-Size = 10x10mm													OHSAS 18001			Heat		
Valores apenas indicativos-Indicative values only													ROHS&ELV			Heat		
Composição Química (% Peso) - Chemical Composition (% Weight)													COMPLIANT PRODUCT			Heat		
C																Heat		
Si																Heat		
Mn																Heat		
P																Heat		
S																Heat		
Al																Heat		
Cu																Heat		
Nb																Heat		
V																Heat		
Ti																Heat		
Cr																Heat		
Ni																Heat		
Mo																Heat		
Sn																Heat		
N																Heat		
B																Heat		
Ca																Heat		
Sb																Heat		
Pb																Heat		
Ceq																Heat		
E = C+Mn/8+(Cr+Mo+V)/5+(Ni+Cu)/15																Heat		
Condição de Fornecimento - Supply Condition																Heat		
LAMINAÇÃO CONTROLADA - THERMO-MECHANICAL ROLLING																Heat		
Observações - Remarks																Heat		
OC 81005																Heat		
880018704																Heat		
FDS - Ficha de Dados de Segurança do Produto número 07, disponível na Extranet da Usiminas																Heat		
MSDS - Material Safety Data Sheet Nº 07 available at Usiminas Extranet																Heat		
*** T E S P ***																Heat		
Continua na Folha - Continued on Sheet: 2																Heat		
<p>Helber Luiz Oliveira Ribeiro</p> <p>SUPERINTENDÊNCIA DE GARANTIA DA QUALIDADE QUALITY ASSURANCE MANAGEMENT</p>										<p>Nota Fiscal Commercial Invoice</p> <p>3 000301065 1</p>			<p>Data de Emissão Date of Issue</p> <p>23/10/2013</p>					
<p>Helber Luiz Oliveira Ribeiro</p> <p>SUPERINTENDÊNCIA DE GARANTIA DA QUALIDADE QUALITY ASSURANCE MANAGEMENT</p>										<p>Ordem de Venda Sale Order</p> <p>Nº</p> <p>9</p>			<p>Nº Certificado Certificate Nº</p> <p>3216474</p>					

Continua...

