



Renan Tassinari Alves

**ANÁLISE ESTRUTURAL ESTÁTICA DO SISTEMA DE
DESCARGA DE UMA COLHEITADEIRA UTILIZANDO O
SOFTWARE ANSYS**

Horizontina

2012

Renan Tassinari Alves

**ANÁLISE ESTRUTURAL ESTÁTICA DO SISTEMA DE
DESCARGA DE UMA COLHEITADEIRA UTILIZANDO O
SOFTWARE ANSYS**

Trabalho Final de Curso apresentado como requisito parcial para a obtenção do título de Bacharel em Engenharia Mecânica, pelo Curso de Engenharia Mecânica da Faculdade Horizontina.

ORIENTADOR: Richard Thomas Lermen, Doutor em Engenharia.

Horizontina

2012

**FAHOR - FACULDADE HORIZONTINA
CURSO DE ENGENHARIA MECÂNICA**

A Comissão Examinadora, abaixo assinada, aprova a monografia:

**“Análise estrutural estática do sistema de descarga de uma colheitadeira
utilizando o software ANSYS”**

Elaborada por:

Renan Tassinari Alves

Como requisito parcial para a obtenção do grau de Bacharel em
Engenharia Mecânica

**Aprovado em: 10/12/2012
Pela Comissão Examinadora**

**Prof. Dr. Richard Thomas Lermen
Presidente da Comissão Examinadora - Orientador**

**Prof. Dr. Ademar Michels
FAHOR – Faculdade Horizontina**

**Prof. Me. Ricardo Ferreira Severo
FAHOR – Faculdade Horizontina**

**Prof. Me. Anderson Dal Molin
Coordenador do Curso de Engenharia Mecânica - FAHOR**

**Horizontina
2012**

DEDICATÓRIA

À minha mãe Glória e meus avós Roni e Nelci, por todos os exemplos, ensinamentos, apoio e dedicação durante toda a minha vida.

À minha amada companheira Cláudia pelo apoio, paciência e motivação para seguir em frente.

AGRADECIMENTOS

Primeiramente gostaria de agradecer a Deus por sempre estar ao meu lado.

À minha família, que sempre me apoiou e me incentivou a seguir em frente e nunca desistir.

Aos professores e funcionários da FAHOR, pelos ensinamentos e exemplos que recebi durante toda a graduação. Em especial ao professor Richard pela dedicação aplicada durante o desenvolvimento deste trabalho.

À AGCO, que me acolheu muito bem e permitiu que realizasse este trabalho. Em especial ao meu gerente Zenir e ao meu orientador Alberto.

Aos meus colegas, que se tornaram grandes amigos ao longo desta jornada. Desejo-lhes muito sucesso e satisfação.

RESUMO

O trabalho consiste na realização de uma análise estrutural estática, através do método de elementos finitos, de uma estrutura tubular do sistema de descarga de grãos de uma colheitadeira. O objetivo do estudo é identificar na estrutura os pontos com as maiores concentrações de tensões e avaliar a confiabilidade da estrutura. A análise foi executada no módulo Mechanical do ANSYS para a condição onde se espera que ocorram as maiores deformações. Para a formulação do problema foram considerados o efeito das juntas parafusadas e uniões soldadas existentes entre os componentes da estrutura. Os resultados foram representados graficamente através das deformações totais e das tensões de von Mises. O estudo provou que a integridade da estrutura não foi comprometida para as condições de contorno aplicadas.

Palavras-chaves:

Análise estrutural – Método de elementos finitos – Sistema de descarga de grãos

ABSTRACT

This paper consists of carrying out a static structural analysis, by the finite element method, of a tubular discharge system of a grain combine harvester. The objective of the study is to identify structure points with the highest stress concentrations and assess the reliability of the structure. The analysis was performed in ANSYS Mechanical under the condition where it is expected that the greatest deformation occurs. In order to formulate the problem, the effect of bolted joints and soldered joints between the components of the structure were considered. The results were plotted using the total deformation and von Mises stresses. The study proved that the structural integrity was not compromised within the boundary conditions imposed.

Keywords:

Structural analysis - Finite element method - Grain unloading system

LISTA DE FIGURAS

Figura 1: Cubo de tensões.....	4
Figura 2: Malha de elementos finitos.	8
Figura 3: Graus de liberdade em um ponto.	9
Figura 4: Tipos de elementos.	10
Figura 5: Resultado do refinamento da malha.....	11
Figura 6: Posições do sistema de descarga.	12
Figura 7: Componentes do sistema de descarga.....	13
Figura 8: Pontos A e B de fixação do sistema de descarga Turrent.....	14
Figura 9: Vista em corte dos pontos de mancalização.....	14
Figura 10: Condições de contorno aplicadas ao sistema de descarga.	16
Figura 11: União através do cordão de solda.	16
Figura 12: Cilindro utilizado para representar o parafuso.....	17
Figura 13: Vista em corte da junta parafusada.....	18
Figura 14: Mancalização do ponto B.....	18
Figura 15: Mancalização do ponto A.....	19
Figura 16: Força aplicada ao sistema de descarga.....	19
Figura 17: Distribuição da malha de elementos finitos.....	20
Figura 18: Deformações resultantes em mm.....	22
Figura 19: Tensões de von Mises.....	22
Figura 20: Tensões de von Mises no tubo vertical.....	23
Figura 21: Tensões de von Mises na curva.	23
Figura 22: Tensões de von Mises no tubo horizontal.....	24

LISTA DE SIMBOLOS

A_s	Área	m^2
L_i	Comprimento inicial	m
L_f	Comprimento final	m
ν	Coefficiente de Poisson	
ϵ	Deformação	m
γ	Distorção	m
U_d	Energia de distorção	W
F	Força	N
G	Módulo de elasticidade transversal	Pa
E	Módulo de Young	Pa
σ	Tensão normal	Pa
τ	Tensão de cisalhamento	Pa
σ_{VM}	Tensão de von Misses	Pa
τ_{max}	Tensão máxima de cisalhamento	Pa

SUMÁRIO

1. INTRODUÇÃO	1
2. REVISÃO DA LITERATURA.....	3
2.1 PRINCÍPIOS DA RESISTÊNCIA DOS MATERIAIS.....	3
2.1.1 TENSÕES E DEFORMAÇÕES.....	3
2.2 TEORIA DE FALHAS.....	6
2.2.1 TEORIA DA ENERGIA DE DISTORÇÃO (VON MISES)	6
2.3 ANÁLISE DE ELEMENTOS FINITOS	7
2.3.1 MÉTODO DE ELEMENTOS FINITOS	7
2.3.2 ESCOLHA DOS ELEMENTOS	9
2.4 COLHEITADEIRA DE GRÃOS.....	11
2.4.1 SISTEMA DE DESCARGA DE GRÃOS.....	12
3. METODOLOGIA	13
3.1. ANÁLISE PRELIMINAR	13
3.2. PRÉ-PROCESSAMENTO	16
3.3. RESOLUÇÃO DO PROBLEMA.....	20
4. APRESENTAÇÃO E ANÁLISE DOS RESULTADOS	22
CONSIDERAÇÕES FINAIS.....	25
REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS.....	26

1. INTRODUÇÃO

Durante a colheita, a colheitadeira está submetida a diversos esforços e oscilações causados por fatores externos, muitas vezes imprevisíveis. Um exemplo são as desuniformidades e imperfeições existentes nos solos das lavouras. Mesmo assim, é necessário que os fabricantes forneçam produtos que suportem estas variações, sem prejudicar sua funcionalidade e integridade até o fim da vida útil estipulada para o produto. Para que isso aconteça é necessário que as colheitadeiras passem por diversas etapas de validação, as quais podem ser através de modelos físicos ou virtuais, e homologação até o seu lançamento.

Nos períodos de testes físicos, em condições de colheita busca-se, geralmente, aperfeiçoar os sistemas de trilha, separação e limpeza, que são os que mais influenciam na eficiência da colheitadeira. Alterações de projeto e falhas nesta etapa podem prejudicar o lançamento do produto porque as janelas de colheitas estão tornando-se cada vez mais curtas e a rotação das culturas plantadas pode gerar intervalos de até um ano até que se repitam as mesmas condições. E isto resultará em prejuízo para a empresa.

É esperado que sistemas auxiliares como o de descarga de grãos já estejam funcionando corretamente e não prejudiquem os testes dos outros sistemas. Uma maneira para fazer com que isto aconteça é a realização de testes virtuais, através de simulações em softwares, durante o desenvolvimento do projeto, evitando desperdício de tempo durante a validação e também prejudicar o restante do projeto.

A solução de problemas físicos através de modelos matemáticos como o método de elementos finitos está se tornando uma prática comum durante o desenvolvimento de projeto de sistemas mecânicos. Através de sistemas assistidos por computadores ("*Computer Aided Systems*" – CAE) é possível analisar a confiabilidade do modelo virtual ("*Computer Aided Design*" – CAD) de estruturas mecânicas antes de se iniciarem as validações nos protótipos físicos.

O objetivo principal do estudo em questão é realizar a análise estrutural do sistema de descarga, que está sendo desenvolvido pela AGCO, através da aplicação do método de elementos finitos. Os objetivos específicos são

determinar a condição crítica de trabalho, analisar como se comportará a estrutura para esta condição e identificar na estrutura as regiões com as maiores concentrações de tensões.

2. REVISÃO DA LITERATURA

2.1 PRINCÍPIOS DA RESISTÊNCIA DOS MATERIAIS

A resistência dos materiais é o campo da ciência e da técnica que estuda o dimensionamento e a otimização da forma dos componentes e das estruturas que compõem os sistemas de engenharias. Seu princípio básico consiste em limitar o valor das tensões que atuam nos componentes em valores que não permitam a ocorrência de falhas. Através da sua aplicação é possível garantir a integridade e funcionalidade dos sistemas de engenharia ao longo de suas vidas úteis. (BOSCH, 2005)

Segundo Bosch (2005), As falhas podem ser efeito das tensões que o sistema está submetido, das condições ambientais, da corrosão e da radiação. As principais falhas que ocorrem em estruturas mecânicas são formações de trincas, fraturas, deformações inaceitáveis – plásticas ou elásticas – e instabilidade por flambagem.

2.1.1 Tensões e deformações

As tensões internas em componentes são resultado das deformações causadas quando este for submetido a forças externas e seu formato original for modificado. Segundo CALLISTER (2002) a tensão normal (σ) é definida pela Equação 1:

$$\sigma = \frac{F}{A_s} \quad (1),$$

onde F é a carga instantânea aplicada perpendicularmente sobre uma seção de área A_s . A deformação (ε) é definida na Equação 2:

$$\varepsilon = \frac{(L_f - L_i)}{L_i} \quad (2),$$

onde, L_i é o comprimento original antes que qualquer carga seja aplicada e L_f é o comprimento instantâneo após a aplicação das forças externas. A correlação entre deformação elástica e tensão pode ser expresso através da Lei de Hooke (Equação 3) (CALLISTER, 2002):

$$\sigma = E\varepsilon \quad (3)$$

As Equações (1), (2) e (3) geralmente, são utilizadas no projeto de componentes quando ele estiver submetido a uma carga uniforme em apenas um sentido, ou seja, quando ele estiver submetido apenas à compressão, tração ou cisalhamento.

Em estruturas submetidas a forças externas as tensões são geralmente distribuídas através de uma função contínua dentro do material e qualquer elemento infinitesimal do material é capaz de sofrer diferentes tensões ao mesmo tempo. Estes elementos podem ser modelados como cubos conforme mostra a Figura 1. Este cubo está sujeito a tensões normais (σ), que atuam perpendicularmente às faces do cubo e tendem a tracionar ou comprimir, ou através de tensões de cisalhamento (τ), que atuam paralelamente as faces do cubo em pares, e tendem a distorcer o cubo (NORTON, 2006).

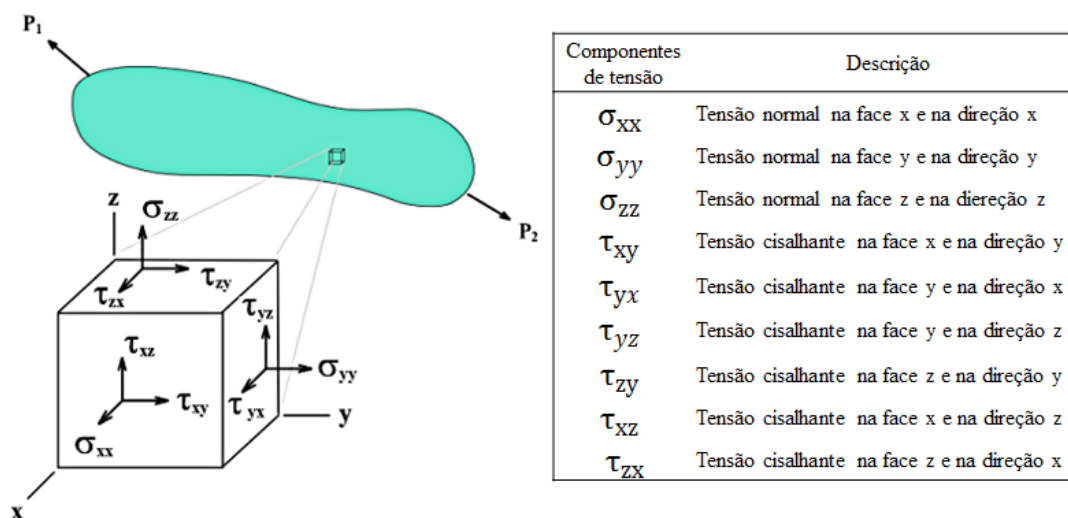


Figura 1: Cubo de tensões. Fonte: Adaptado de Kim et al., 2011, p. 17.

Conforme Kim et al. (2011), as tensões em um ponto qualquer de um sólido podem ser completamente representadas em três dimensões usando notação matricial através da matriz de tensões $[\sigma]$, onde:

$$[\sigma] = \begin{bmatrix} \sigma_{xx} & \tau_{yx} & \tau_{zx} \\ \tau_{xy} & \sigma_{yy} & \tau_{zy} \\ \tau_{xz} & \tau_{yz} & \sigma_{zz} \end{bmatrix} \quad (4)$$

A maioria dos materiais de aplicação mecânica são isotrópicos e sua aplicação está restringida dentro de seu limite elástico. Conforme Norton (2006), as deformações em qualquer ponto na estrutura possuem uma relação linear elástica com as tensões através da lei de Hooke. Desta forma, as deformações também podem ser representadas através de uma matriz de deformações $[\varepsilon]$, onde ε é a deformação específica normal gerada pela tensões normal e γ é a distorção causada pela força cisalhante.

$$[\varepsilon] = \begin{bmatrix} \varepsilon_{xx} & \gamma_{yx} & \gamma_{zx} \\ \gamma_{xy} & \varepsilon_{yy} & \gamma_{zy} \\ \gamma_{xz} & \gamma_{yz} & \varepsilon_{zz} \end{bmatrix} \quad (5)$$

Para materiais isotrópicos, a relação entre as tensões principais e as deformações principais pode ser descrita através da simplificação da Lei de Hooke generalizada, conforme mostram as Equações 6 e 7 (KIM et al., 2006):

$$\begin{Bmatrix} \varepsilon_{xx} \\ \varepsilon_{yy} \\ \varepsilon_{zz} \end{Bmatrix} = \frac{1}{E} \begin{bmatrix} 1 & -\nu & -\nu \\ -\nu & 1 & -\nu \\ -\nu & -\nu & 1 \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} \sigma_{xx} \\ \sigma_{yy} \\ \sigma_{zz} \end{Bmatrix} \quad (6),$$

$$\gamma_{xy} = \frac{\tau_{xy}}{G} ; \gamma_{yz} = \frac{\tau_{yz}}{G} ; \gamma_{zx} = \frac{\tau_{zx}}{G} \quad (7),$$

onde o módulo de Young, E , e o coeficiente de Poisson, ν , são duas constantes elásticas independentes e G é o módulo de elasticidade transversal, expresso pela Equação 8.

$$G = \frac{E}{2(1+\nu)} \quad (8)$$

Segundo Kim et al. (2011), as relações tridimensionais para estruturas podem ser simplificadas para relações bidimensionais, conforme Equação 9 quando o componente possuir espessura fina.

$$\begin{Bmatrix} \varepsilon_{xx} \\ \varepsilon_{yy} \\ \gamma_{xy} \end{Bmatrix} = \frac{(1+\nu)}{E} \begin{bmatrix} 1-\nu & \nu & 0 \\ \nu & 1-\nu & 0 \\ 0 & 0 & 2 \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} \sigma_{xx} \\ \sigma_{yy} \\ \tau_{xy} \end{Bmatrix} \quad (9)$$

2.2 TEORIA DE FALHAS

Conforme Kim et al. (2011), A falha em materiais de engenharia pode ser classificada em dúctil e frágil. A maioria dos metais é dúctil e sua falha se dá pelo escoamento. Por isso a resistência ao escoamento caracteriza a sua falha. As cerâmicas e alguns polímeros são frágeis e eles se rompem ou se fraturam quando a tensão supera determinado valor máximo. O comportamento de sua tensão-deformação é linear até o ponto de falha, e eles falham abruptamente.

Para análise de sólidos constituídos de material dúctil existem a teoria da energia de distorção (von Mises) e a teoria da máxima tensão cisalhante (Tresca), enquanto que para a análise de material frágil é utilizada a teoria da tensão principal máxima (Rankine) (BUDYNAS et al., 2006).

O sistema de descarga ao qual este estudo é dirigido é constituído elementos produzidos em aço dúctil e por isto apenas a teoria da energia de distorção, considerada por Budynas et al. (2006) mais conservativa foi utilizada na análise de falhas.

2.2.1 Teoria da energia de distorção (von Mises)

Conforme Kim et al. (2011), quando existe mudança de forma em um sólido causado por forças externas também existe o armazenamento, no sólido, de energia potencial, chamada de energia de deformação. Esta energia de deformação é constituída de dois componentes, um devido à dilatação ou variação de volume e outro devido à distorção ou variação do formato, respectivamente, denominados como energia de dilatação e energia de distorção. A energia de distorção U_d é denominada através da Equação 10, onde σ_{VM} é a tensão de von Mises definida em termos das tensões principais do componente (σ_1 ; σ_2 ; σ_3).

$$U_d = \frac{1+\nu}{3E} \sigma_{VM}^2 \quad (10),$$

$$\sigma_{VM} = \sqrt{\frac{(\sigma_1 - \sigma_2)^2 + (\sigma_2 - \sigma_3)^2 + (\sigma_3 - \sigma_1)^2}{2}} \quad (11)$$

Segundo Budynas et al. (2006), a teoria da energia de distorção estipula que a falha no material ocorrerá por escoamento quando a energia de distorção por unidade de volume exceder a energia de distorção necessária para romper o material através de um ensaio de tração. Desta forma a falha ocorrerá quando $\sigma_{VM} \geq \sigma$. Para situações onde o componente estiver submetido a apenas cisalhamento, o material escoará quando $\tau_{max} \geq 0,577\sigma$.

2.3 ANÁLISE DE ELEMENTOS FINITOS

Em estudo do comportamento de sistemas físicos são utilizados modelos físicos (usualmente em escala reduzida) e/ou modelos matemáticos. O avanço da ciência e o cotejamento entre esses modelos tem motivado um grande desenvolvimento dos modelos matemáticos, propiciando modelagens realísticas, confiáveis e de aplicações práticas na engenharia, muito mais econômicas do que os modelos físicos (SORIANO, 2003).

Entre os modelos matemáticos, o método de elementos finitos foi desenvolvido para a análise de meios contínuos e atualmente pode ser utilizado para análise de todos os sistemas físicos dos quais trata a engenharia.

O método de elementos finitos (MEF) é um dos métodos numéricos para resolver equações diferenciais que descrevem muitos problemas de engenharia. O MEF, que teve origem na área da mecânica estrutural, foi estendido a outras áreas da mecânica dos sólidos e posteriormente a outros campos como transferência de calor, dinâmica dos fluidos e eletromagnetismo. Na realidade, o MEF foi reconhecido como uma ferramenta poderosa para resolver equações diferenciais e equações integrodiferenciais e, em um futuro próximo, pode se tornar o método numérico preferido de muitas áreas da engenharia e das ciências aplicadas. Um dos motivos para sua popularidade é que o método resulta em programas computacionais naturalmente versáteis (Kim et al., 2011, p. 49).

2.3.1 Método de elementos finitos

Segundo Bosch (2005), a aplicação do método de elementos finitos consiste na divisão de qualquer corpo em elementos de forma simples (reta, triângulo, quadrado, tetraedro, pentaedro ou hexaedro), tão pequenos quanto possível e que estejam permanentemente conectados entre si através de seus vértices (nós). O princípio básico consiste na linearização de todos os processos utilizando equações lineares que descrevem o comportamento dos nós.

De acordo com Cesa (2010), o método dos elementos finitos considera a região (contínuo) de solução do problema formada por pequenos elementos interligados entre si, conforme Figura 2. A região em estudo é modelada ou aproximada por um conjunto de elementos discretos pré-definidos. Uma vez que estes elementos podem ser colocados juntos em um número incontável de diferentes configurações, pode-se modelar formas geométricas bastante complexas. Além disso, possibilita que o projetista tenha bastante flexibilidade na aplicação de cargas e condições de contorno, o que torna este método o mais amplamente utilizado para análises estruturais.

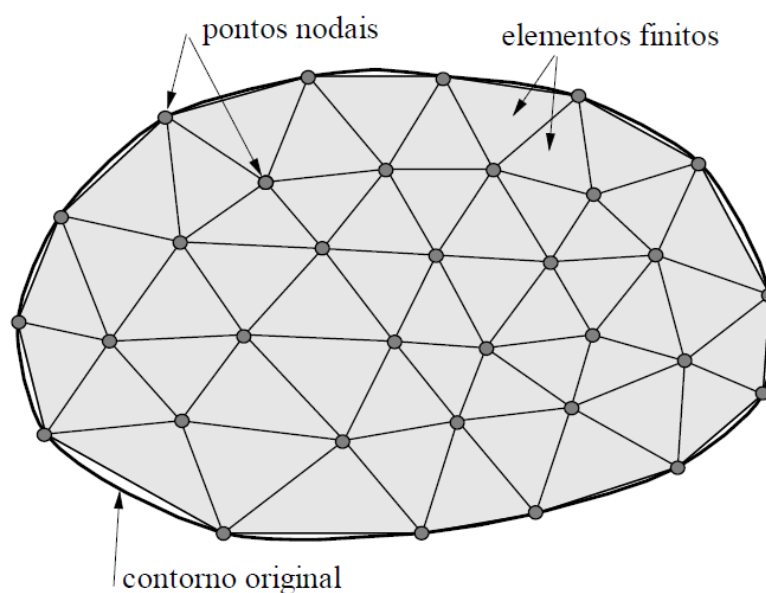


Figura 2: Malha de elementos finitos. Fonte: Souza, 2003 p. 1.

O conjunto de nós e elementos utilizado para a discretização do modelo é denominado de malha. Segundo Budynas et al. (2006), os nós são as entidades fundamentais dos elementos, são nos nós que os elementos se conectam entre si, onde as propriedades elásticas do elemento são estabelecidas e onde as forças e condições de contorno são definidas. Os nós possuem graus de liberdade, que correspondem aos possíveis movimentos rotacionais e translacionais que eles podem sofrer, conforme mostra a Figura 3.

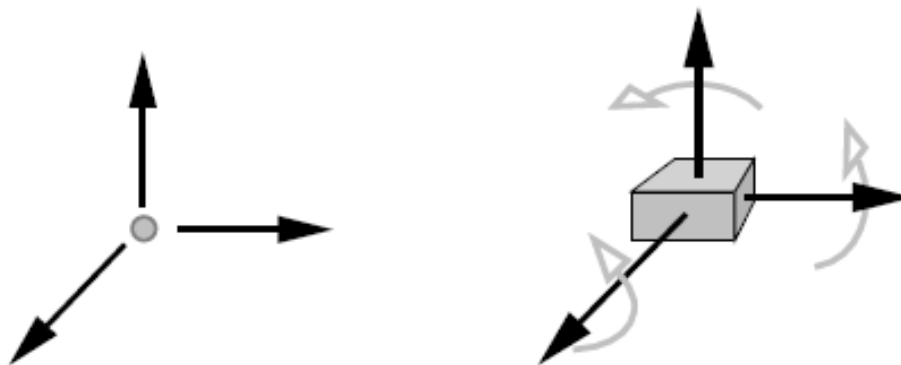


Figura 3: Graus de liberdade em um ponto. Fonte: Souza, 2003 p. 5.

Através do uso de funções polinomiais integradas a matrizes pode-se definir o comportamento elástico de cada elemento, através da Equação 12 (KIM et al., 2006).

$$[k^e]\{q^e\} = \{f^e\} \quad (12),$$

onde $[k^e]$ é a matriz de rigidez do elemento, $\{q^e\}$ é o vetor dos graus de liberdade associado com o elemento e $\{f^e\}$ é o vetor das forças que agem no elemento.

Depois que todos os elementos da estrutura forem definidos localmente na forma de matrizes, é possível montar a matriz global, que descreve o comportamento da estrutura, através das conexões existentes entre os nós dos elementos através da Equação 13.

$$[K]\{Q\} = \{F\} \quad (13),$$

onde, $[K]$ é a matriz de rigidez global, $\{Q\}$ é o vetor dos graus de liberdade conhecidos e $\{F\}$ é o vetor das forças conhecidas.

2.3.2 Escolha dos elementos

Segundo Alves (2000), o ponto principal para a elaboração do modelo CAE é a escolha dos elementos que representarão cada trecho da estrutura. Deve-se buscar identificar como será o comportamento físico em cada trecho da estrutura e a partir deste entendimento partir para a escolha dos elementos

finitos na biblioteca do software. Os elementos podem ser representados de várias formas, conforme mostra a Figura 4.

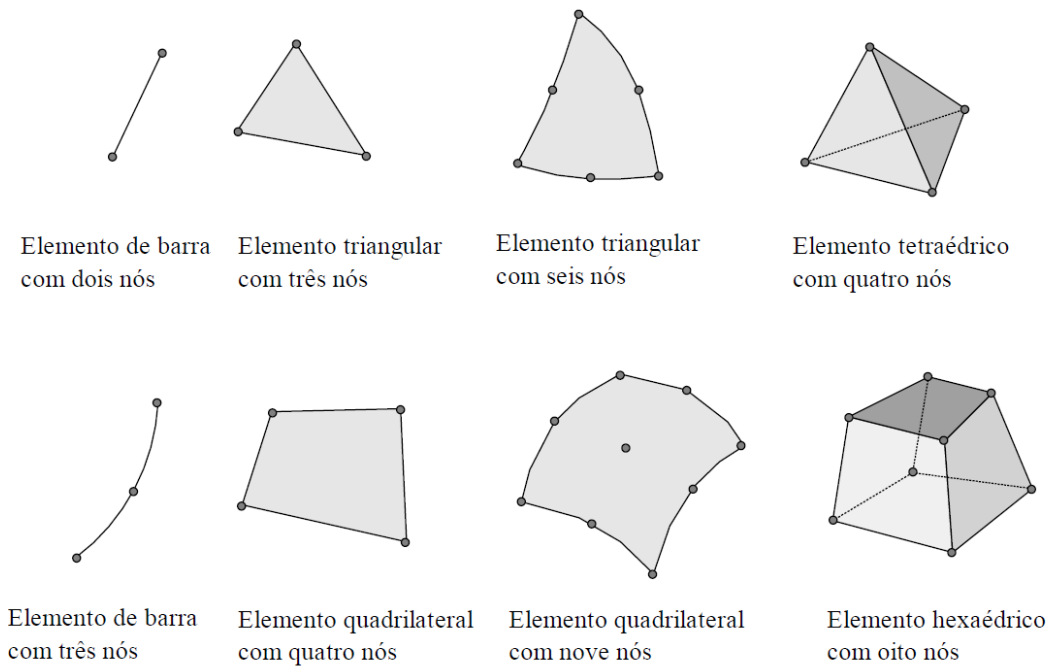


Figura 4: Tipos de elementos. Fonte: Souza, 2003 p. 2.

A malha é refinada, ou seja, a quantidade de elementos é aumentada, entre as análises, para aumentar a qualidade dos resultados em áreas com grandes concentrações de tensões e zonas de transições geométricas. Normalmente os resultados da análise de elementos finitos converge para o resultado real quando a malha é continuamente refinada, e conseqüentemente, o grau das equações polinomiais (P) utilizadas na solução são aumentadas, conforme mostra a Figura 5 (BUDYNAS et al., 2006).

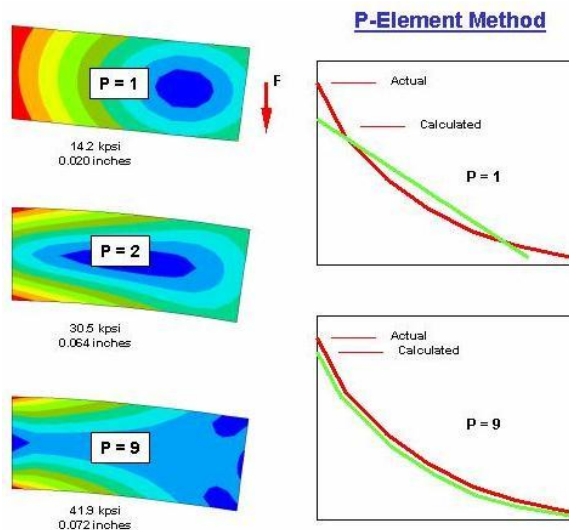


Figura 5: Resultado do refinamento da malha. Fonte: TSD Engineering.

A malha é gerada automaticamente pelos softwares de elementos finitos e normalmente durante a primeira análise utiliza-se uma malha grosseira onde não é definida nenhuma área de refinamento. A partir dos resultados é possível então, identificar as áreas com maior concentração de tensões e aplicar refinamentos nestas regiões até que os resultados comecem a convergir para o resultado exato. Quanto maior for a quantidade de elementos utilizado para a solução da análise, maior será também o tempo de computação necessário para a geração dos resultados (Norton, 2006).

Bosch (2005) afirma que a qualidade do resultado da análise irá variar conforme a qualidade da equação e do tamanho da malha.

2.4 COLHEITADEIRA DE GRÃOS

Atualmente existem diversas máquinas e equipamentos agrícolas que são utilizados durante as etapas de produção de alimentos. Entre elas, as colheitadeiras de grãos são máquinas autopropelidas utilizadas na etapa de colheita de cereais. Elas desempenham papel fundamental para o sucesso da colheita, sendo capazes de realizar o corte da cultura, separar os grãos da palhada e armazená-los.

De acordo com Höher Jr. (2011), as colheitadeiras podem variar quanto a sua construção e são classificadas conforme o sistema de trilha e separação que possuem. Elas podem apresentar sistema convencional, sistema axial longitudinal e o sistema híbrido.

2.4.1 Sistema de descarga de grãos

Independente da classificação da colheitadeira, ela necessitará possuir um sistema de descarga. Este sistema de descarga tem a função de transportar e descarregar os grãos que já foram separados da vagem e estão armazenados no tanque de grãos para caminhões ou tanques graneleiros, que por sua vez transportarão os grãos para silos de armazenamento ou unidades de processamento.

A maioria dos fabricantes de colheitadeiras adotam uma configuração padrão para os sistemas atuais. Os sistemas de descargas atuais realizam o transporte de grãos através de roscas transportadoras que estão montadas dentro uma estrutura tubular, formando o conjunto chamado de tubo de descarga. Para que seja mantida a largura da colheitadeira, no caso de transporte, o tubo de descarga é tipicamente pivotado entre uma posição retraída, onde o tubo é disposto longitudinalmente na colheitadeira, e uma posição de descarga, onde o bocal de descarga é disposto transversalmente espaçado do corpo da máquina, conforme Figura 6. Atuadores hidráulicos normalmente são utilizados para mover o tubo entre as duas posições (HOLLATZ, 2012).

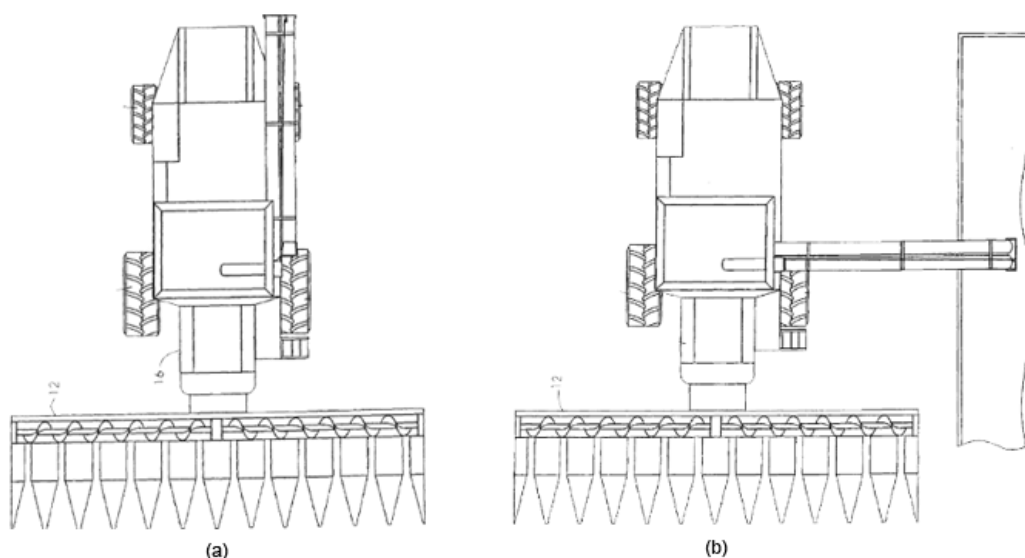


Figura 6: Posições do sistema de descarga. (a) tubo recolhido; (b) tubo na posição de descarga. Fonte: Adaptado de Dillon, 2007, p3 e p4.

3. METODOLOGIA

O sistema de descarga, ao qual a análise de elementos finitos foi aplicada, é do tipo Turrent, ou canhão, conforme mostra a Figura 7. Ele é formado por uma estrutura tubular composta pelos conjuntos soldados (tubo vertical, curva e tubo horizontal), dois helicóides que são utilizados para realizar a descarga dos grãos e suportes para mancalização dos mesmos.

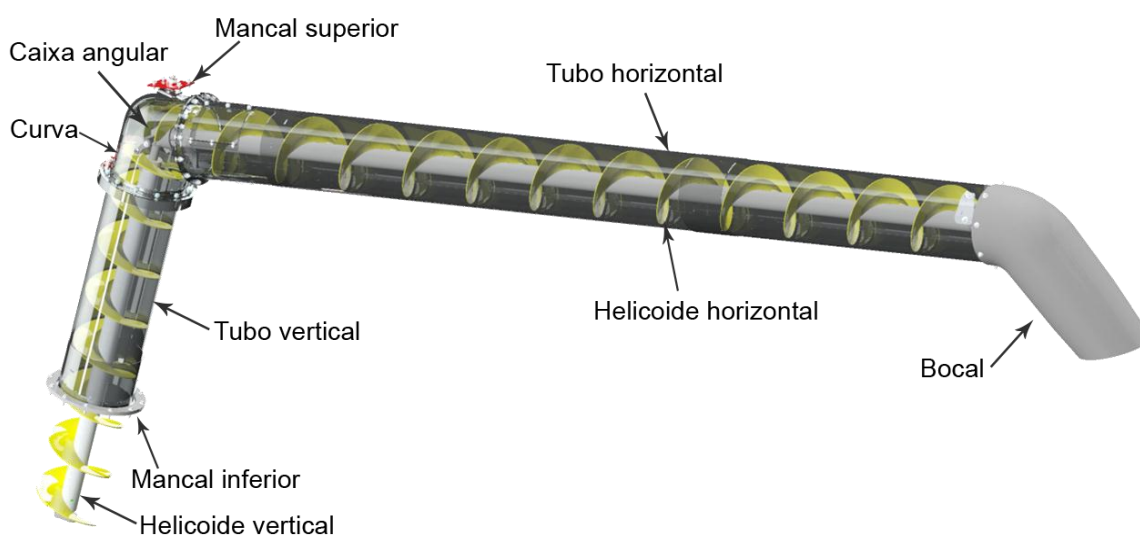


Figura 7: Componentes do sistema de descarga.

A metodologia utilizada para solução da análise de elementos finitos é composta de três etapas: análise preliminar; pré-processamento; resolução do problema.

3.1. ANÁLISE PRELIMINAR

Na análise preliminar buscou-se prever o comportamento do sistema, isto é, determinar os esforços sofridos pelo sistema e definir as condições de contorno para o estudo.

A estrutura foi projetada para ser montada na colheitadeira em dois pontos e a união entre os componentes da estrutura é feita através de juntas parafusadas, conforme representado na Figura 8.



Figura 8: Pontos A e B de fixação do sistema de descarga Turrent.

O ponto A é montado dentro do tanque de grãos, onde a flange do tubo vertical é fixada entre duas chapas, conforme Figura 9-a e 9-b, formando uma espécie de “sanduíche” que permite que a estrutura exerça rotação entre o eixo formado pelos pontos A e B. O ponto B, mostrado na Figura 9-c, na parte superior da estrutura, é formado por um embuchamento que serve de apoio para que a estrutura gire sobre AB, e diminui o momento torçor gerado no ponto A pelo tubo horizontal em balanço.

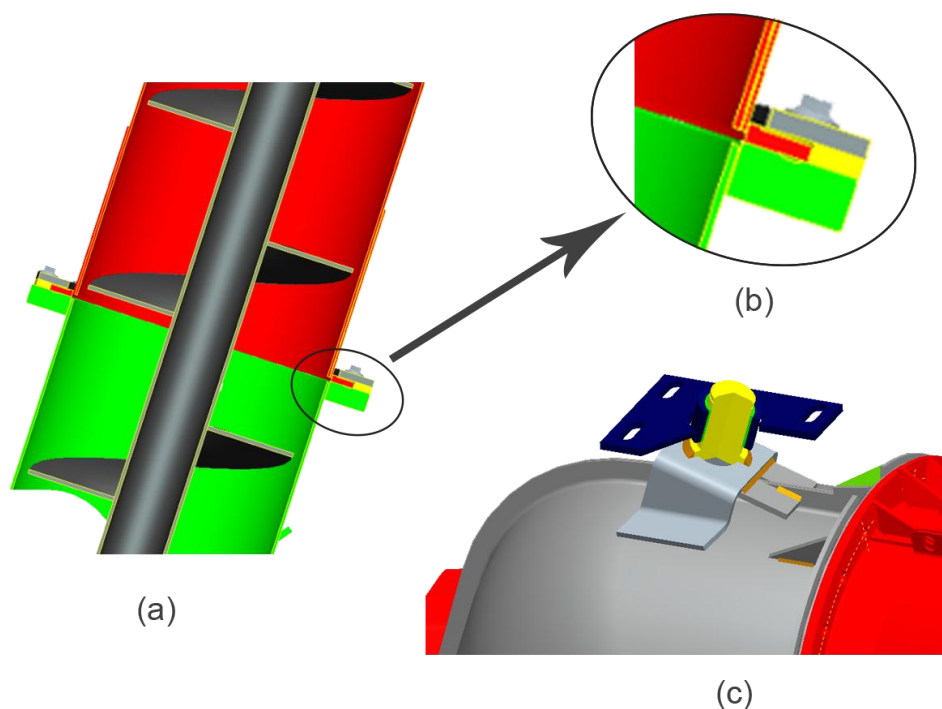


Figura 9: Vista em corte dos pontos de mancalização. (a) Mancal A; (b) detalhe do mancal A; (c) Mancal B.

Para a simplificação da análise foram utilizadas apenas as estruturas tubulares e as chapas de fixação e mancalização. Os outros componentes foram suprimidos. Sendo considerada a massa do helicóide horizontal, de 48 kg, aplicada em seu centro de gravidade. A massa do helicóide vertical foi excluída do estudo porque ele está apoiado no fundo do tanque de grãos, o qual não faz parte deste estudo.

Durante a colheita, é possível que em determinado momento o sistema de descarga esteja preenchido com o grão da cultura que está sendo colhida. A massa distribuída sobre a superfície do tubo horizontal quando o sistema estiver cheio foi levada em consideração durante a análise. A massa distribuída no tubo vertical foi excluída do estudo porque a inclinação na vertical é pequena e grande parte da massa estará sobre o helicóide vertical que não está apoiado na estrutura do estudo.

Através do software Pro-Engineer foi determinado que o tubo horizontal é capaz de armazenar 248,7 litros e a massa distribuída varia conforme a densidade da cultura de cereal que está sendo colhido pela máquina. Para realização da análise foi considerado a massa específica do trigo de 772 kg/m^3 , conforme ANSI/ASAE D241.4. Desta forma, aproximadamente, 192 kg estarão distribuídos sobre a estrutura.

Para a realização da análise, a condição de contorno (crítica) foi definida para a situação em que o tubo encontra-se totalmente cheio e considera-se que uma aceleração (a) de 1.5 g está atuando sobre o sistema no sentido vertical com direção para baixo. A soma da massa do cereal que está no tubo horizontal e a massa do helicóide horizontal foi aplicada como uma força (F) pontual no centro de gravidade do tubo horizontal, com intensidade de 2400 N. As condições de contorno aplicadas na análise estão representada na Figura 10. A posição do centro de gravidade (CG) do tubo horizontal foi determinada através do Pro-Engineer e a aceleração utilizada é resultado de coletas realizadas em sistemas de descarga similares em colheitadeiras da AGCO, para condições normais de colheita.

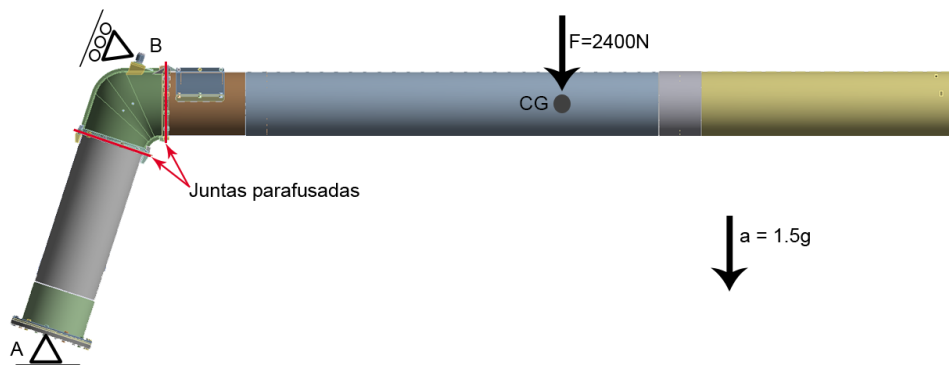


Figura 10: Condições de contorno aplicadas ao sistema de descarga.

3.2. PRÉ-PROCESSAMENTO

Nesta etapa foi realizada a preparação do modelo para a análise de elementos finitos. Ela abrange desde a criação da malha do modelo até a aplicação das condições de contorno do sistema. Ela foi realizada no módulo Mechanical do ANSYS utilizando o modelo CAD existente e disponibilizado pela AGCO.

O primeiro passo foi adicionar ao modelo os cordões de solda existentes entre os componentes. A criação dos cordões foi feita no software Pro-Engineer dentro do modelo da estrutura já existente. Após a criação dos cordões foram definidos manualmente no ANSYS os contatos entre os componentes que compõem cada conjunto soldado. O contato entre as chapas não existe diretamente, mas por meio dos cordões de solda, conforme mostra a Figura 11. Todas as uniões de solda foram consideradas como contatos colados (“bonded”) no ANSYS.

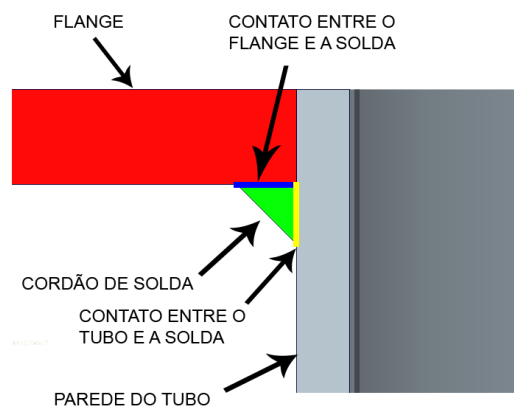


Figura 11: União através do cordão de solda.

A união entre os conjuntos soldados que compõem a estrutura é feita através de juntas parafusadas. Todos os parafusos utilizados são especificados conforme norma ISO 4017 M10 e suas propriedades mecânicas obedecem a classe 8.8 da norma ISO 898-1 com tensão máxima de escoamento de 650 MPa.

Para representar o efeito da junta parafusada no modelo de elementos finitos foram modelados no software Pro-Engineer cilindros com um rebaixo central conforme mostra a Figura 12 e montados onde existe a união parafusada no sistema.

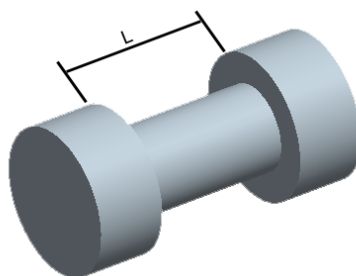


Figura 12: Cilindro utilizado para representar o parafuso.

O diâmetro do rebaixo central do cilindro é de 10 mm, igual ao diâmetro do parafuso, e o comprimento (L) varia conforme a espessura do conjunto de chapas que são unidas.

Para a criação dos contatos entre as juntas parafusadas foi considerado que as faces adjacentes ao rebaixo dos parafusos estão fixas às faces externas dos flanges através de contatos colados (*"bonded"*), conforme mostra Figura 13. No rebaixo do cilindro foi aplicada a pré-carga (F_i) de 19,5 kN para cada parafuso, correspondente à força utilizada para fazer o aperto do parafuso. Entre as flanges foram adicionados contatos com atrito (*"frictional"*) com coeficiente atrito (μ) de 0,2. Os valores de F_i e μ foram extraídos do manual para o cálculo de juntas parafusadas VDI 2230-1 (2003).

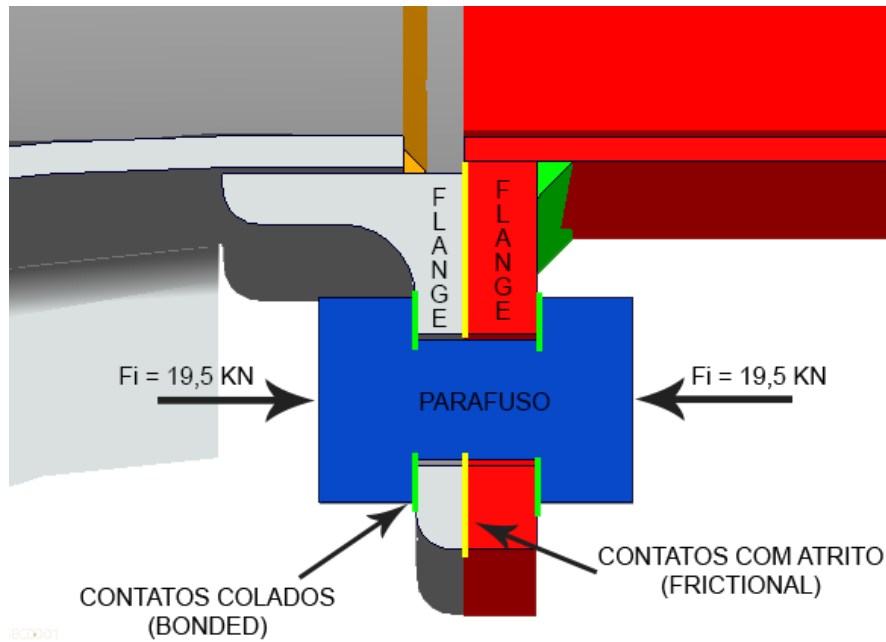


Figura 13: Vista em corte da junta parafusada.

No ponto de mancalização superior B do sistema foi utilizada uma bucha para representar o suporte fixação (“*fixed support*”). O contato do suporte e a estrutura foi criado entre a bucha e o eixo do conjunto curva, conforme Figura 14. O contato foi criado sem atrito (“*frictionless*”).

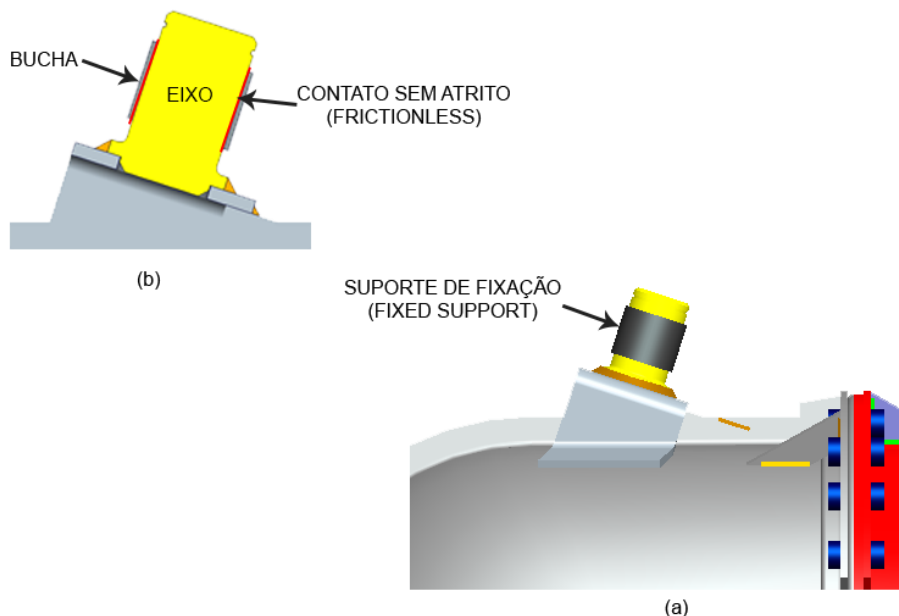


Figura 14: Mancalização do ponto B. (a) representação do contato de fixação; (b) detalhe em corte.

No ponto de mancalização A o suporte rígido (“*fixed support*”) foi aplicado na chapa de base, sobre a qual o tubo vertical está apoiado. Entre o

tubo vertical e as chapas de base e superior foram aplicados contatos sem atrito (“*frictionless*”) que permitem que o tubo exerça o movimento de giro. Entre a chapa espaçadora e a face externa do flange do tubo vertical também foram adicionados contatos sem atrito (“*frictionless*”). Entre o espaçador e a base e entre o espaçador e a chapa superior foram aplicados contatos colados (“*bonded*”). A Figura 15 representa os contatos no ponto A.

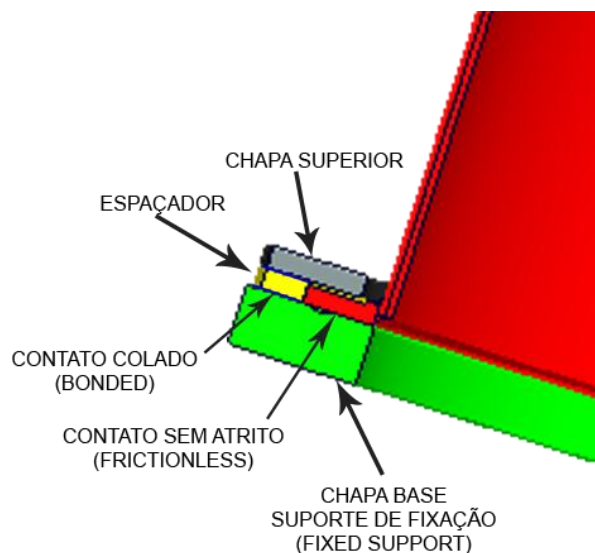


Figura 15: Mancalização do ponto A.

A força causada pelas massas do helicóide e do material no tubo de descarga foi aplicada no centro de gravidade do tubo horizontal através de um ponto remoto no centro da circunferência, conforme Figura 16. A força foi aplicada no sentido vertical com intensidade 2400 N direcionada para baixo.

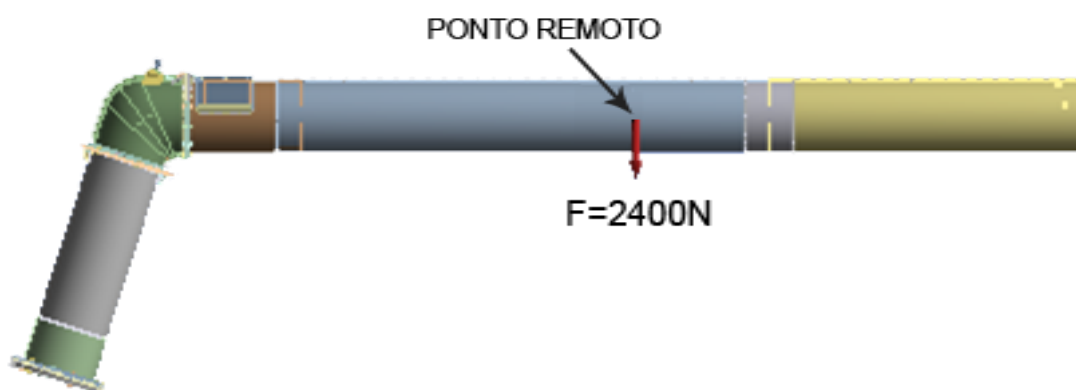


Figura 16: Força aplicada ao sistema de descarga.

3.3. RESOLUÇÃO DO PROBLEMA

Nesta etapa foram geradas as malhas dos elementos do sistema e aplicado o método de elementos finitos para encontrar a solução. A análise aplicada foi estrutural estática e foi realizada no módulo Mechanical do ANSYS.

Todos os elementos que compõem a estrutura do sistema de descarga são compostos de aço com as mesmas propriedades mecânicas. A Tabela 1 descreve as propriedades do material que foram utilizadas para solução do problema.

Tabela 1. Propriedades do material. Fonte: ANSYS (2012)

Propriedades do material	
Tensão de ruptura (σ)	460 MPa
Tensão de escoamento (σ_e)	250 MPa
Módulo de Young (E)	210 GPa
Coefficiente de Poisson (ν)	0,3
Massa específica (γ)	7850 kg/m ³
Temperatura (T)	22°C

Foram utilizados elementos sólidos para a geração da malha da estrutura, sendo necessária a aplicação de refinamentos para que o resultado convergisse. A malha da estrutura é formada por 102.739 elementos e 238.887 nós. A Figura 17 ilustra como estão arranjados os elementos na estrutura.

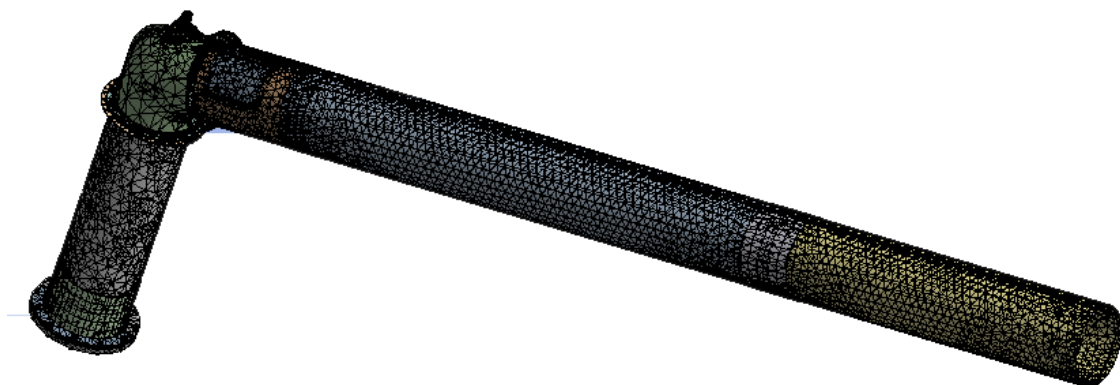


Figura 17: Distribuição da malha de elementos finitos.

A solução do problema foi executada em duas etapas. Na primeira etapa realizou-se a pré-carga das uniões parafusadas, para que todas as folgas entre os contatos fossem eliminados e na segunda etapa foram aplicadas a força vertical de 2400 N e a aceleração de 1.5 g.

4. APRESENTAÇÃO E ANÁLISE DOS RESULTADOS

Após a conclusão da metodologia utilizada os resultados encontrados foram analisados.

Uma das análises realizada foi quanto as deformações existentes no sistema. A figura 18 mostra as deformações encontradas. A deformação máxima ocorre na extremidade livre do tubo em balanço, com valor de 8,2 mm.

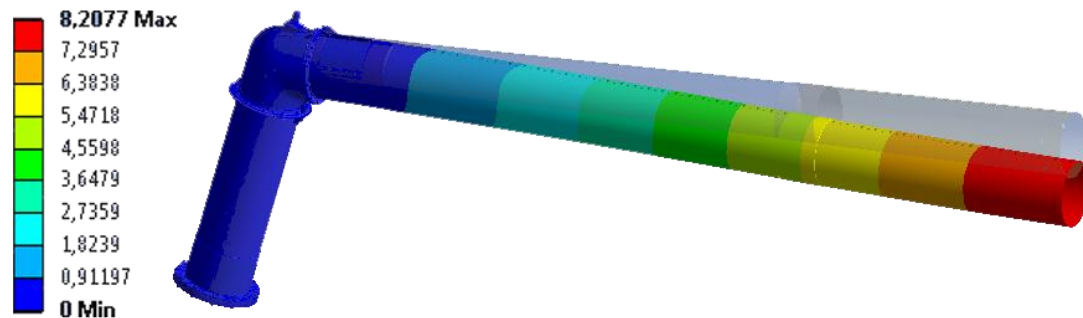


Figura 18: Deformações resultantes em mm.

Os resultados das tensões foram calculados através da equação de von Mises. A Figura 19 mostra que em nenhuma região da estrutura as tensões excedem o limite do material de 250 MPa.

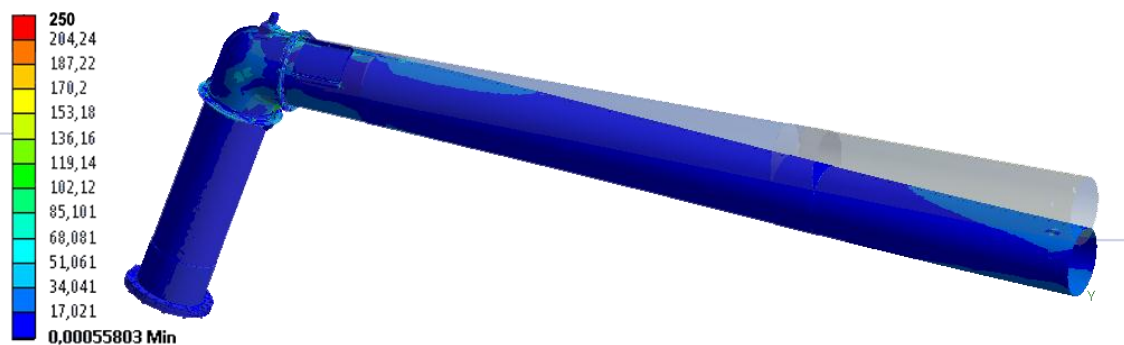


Figura 19: Tensões de von Mises.

Para representar os pontos com maiores concentrações de tensões, os conjuntos soldados foram analisados individualmente. No tubo vertical observou-se que as maiores concentrações de tensões ocorreram entre a união soldada do flange superior com o tubo, conforme Figura 20. A região da

solda oposta ao tubo horizontal em balanço apresentou tensão máxima de 207 MPa.

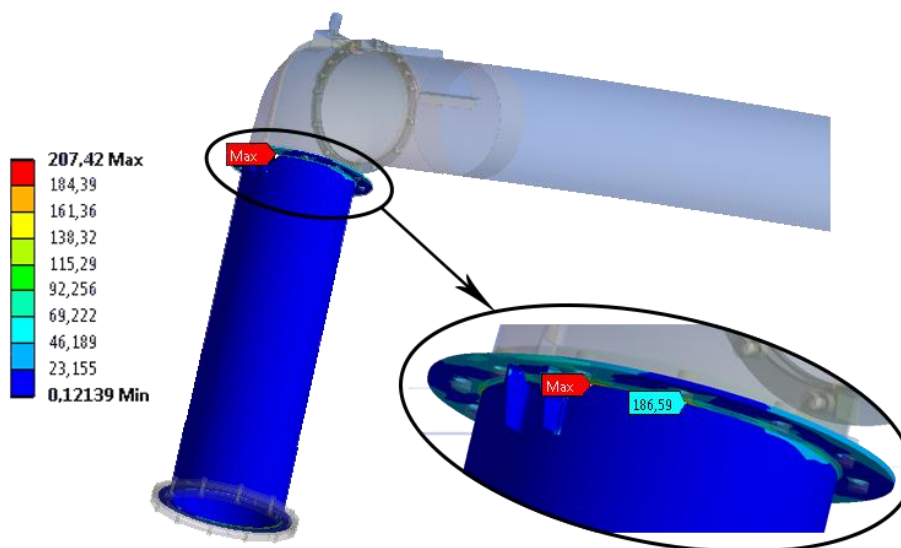


Figura 20: Tensões de von Mises no tubo vertical.

No conjunto curva, as maiores tensões foram encontradas no reforço inferior do conjunto e na junta soldada do mancal superior, conforme mostra a Figura 21. O reforço inferior esteve submetido à compressão e a tensão máxima foi de 145 MPa. A junta soldada apresentou tensão máxima de 218,5 MPa. As duas regiões apresentaram as maiores concentrações porque é através delas que é transmitido o momento causado pelo tubo horizontal no eixo AB formado pelos mancais superior e inferior.

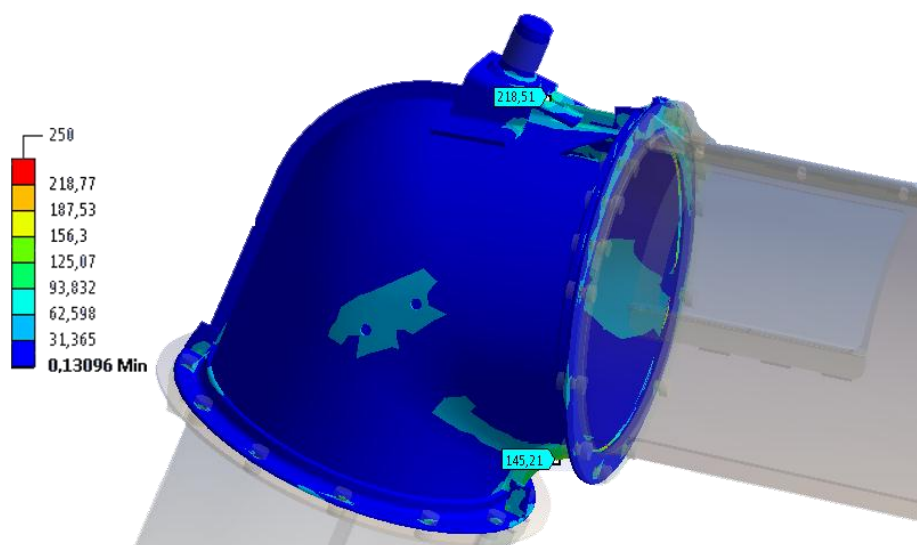


Figura 21: Tensões de von Mises na curva.

A Figura 22 mostra que no tubo horizontal os valores máximos de tensões foram encontrados na solda existente em um dos reforços superiores. Nesta região, a solda esteve submetida à tração causada pelo tubo em balanço, com máxima de 173 MPa.

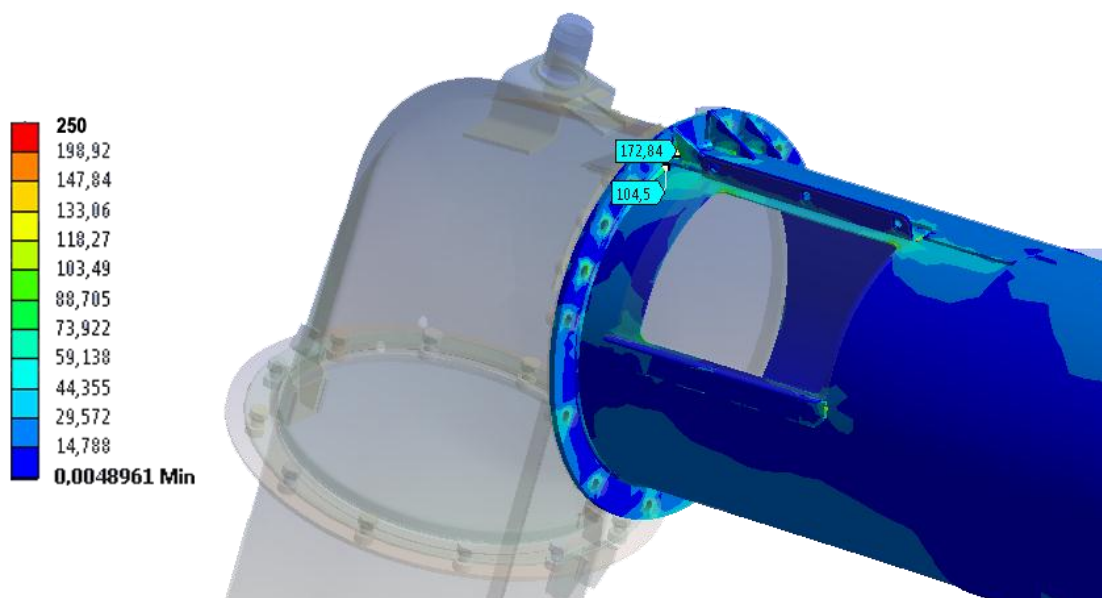


Figura 22: Tensões de von Mises no tubo horizontal.

Durante a realização da análise foi observado que as regiões onde apareceram as maiores concentrações de tensões estão sobre um plano vertical que passa pelo centro do tubo horizontal. Isto significa que o momento gerado pelo tubo horizontal na estrutura tem grande influência na integridade da estrutura.

CONSIDERAÇÕES FINAIS

De acordo com os resultados obtidos nas análises realizadas, as seguintes conclusões podem ser retiradas:

- Foi realizada a análise estrutural estática do sistema de descarga de grãos;
- O estudo comprovou que a estrutura do sistema de descarga de grãos está adequada para a aplicação;
- Foram identificadas as zonas de maiores concentrações de tensões, as quais localizam-se nas uniões soldadas;
- Foi identificado que a tensão máxima ocorre na junta soldada do conjunto curva, causado pelo tubo horizontal em balanço.
- Foi observado que o momento gerado pelo tubo horizontal na estrutura tem grande influência na integridade do conjunto.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

ALVES, Avelino Filho. **Elementos Finitos a base da Tecnologia CAE**. São Paulo: Editora Érica, 2000.

ANSI/ASAE D241.4. **Density, Specific Gravity, and Mass-Moisture Relationships of Grain for Storage**. Estados Unidos: American society of automotive engineering, 2003.

BOSCH, ROBERT. **Manual da tecnologia automotiva**. Trad. de H. Madjderey, G. W. Prokesch, E. J. Zerbini e S. Pfeferman. São Paulo: Ed. Edgard Blücher, 2005.

BUDYNAS, G. RICHARD; NISBETT, KEITH J.; **Shigley's Mechanical Engineering Design**. 8ed. Estados Unidos: McGraw-Hill Primis, 2006.

CALLISTER, W. D. **Ciência e Engenharia de Materiais: Uma Introdução**. 5ed. São Paulo: LTC, 2002.

CESA, T. R. **Design de uma estrutura de proteção contra capotamento para tratores agrícolas utilizando simulação computacional**. 2010. Dissertação (Mestrado em Design) – Faculdade de Arquitetura, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2010.

DILLON, N. BEN. **Patent application title: Combine dual Auger Unloader**. Número da patente: US7198449 B2. Estados Unidos, 2007.

HOLLATZ, J. BRIAN. **Patent application title: Combine Harvester Unloading System**. Número da patente. 20120214561; Italia, 2012.

ISO 4017. **Hexagon head screws - Product grades A and B**. Suíça: International Organization of Standardization, 2011.

ISO 898-1. **Mechanical properties of fasteners made of carbon steel and alloy steel - Part 1: Bolts, screws and studs with specified property classes - Coarse thread and fine pitch thread**. Suíça: International Organization of Standardization, 2009.

HÖHER JR., A. **Design de uma peneira rotativa para uma colheitadeira de grãos**. 2011. Dissertação (Mestrado em Design) – Faculdade de Arquitetura, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2011.

KIM, NAM-HO; SANKAR, BHAVANI V.; **Introdução à Análise e ao Projeto em Elementos Finitos**. Trad. de A. E. A. Kurban. Rio de Janeiro: LTC, 2011.

NORTON, L. ROBERT; **Machine Design: An Integrated Approach**. 3ed. New Jersey: Prentice Hall, 2006.

SORIANO, HUMBERTO LIMA. **Método de elementos finitos em Análise de Estruturas**. São Paulo: Edusp, 2003.

SOUZA, R. M. **O Método dos Elementos Finitos Aplicado ao Problema de Condução de Calor**. Belém, 2003.

TSD ENGINEERING. **FEA and Convergence Basics**. Disponível em <http://www.tsdesigning.com/pages/conv_basic.html>. Acesso em 10 ago 12.

VDI 2230-1. **Systematic calculation of high duty bolted joints - Joints with one cylindrical bolt.** Düsseldorf: Verein Deutscher Ingenieure, 2003.