

OTIMIZAÇÃO DO PROJETO DE POLIAS FABRICADAS EM FERRO FUNDIDO CINZENTO GG-15 UTILIZADAS NO SETOR DE ORDENHADEIRAS

Juliano Vassoler Rabelo¹

Luiz Carlos de Cesaro Cavaler²

Resumo: A otimização de uma polia resulta na redução de sua respectiva massa, sendo um dos fatores que levam a uma redução de custos desse componente mecânico. Esse trabalho propõe a otimização de dois projetos de polias de ferro fundido cinzento GG-15 conforme norma DIN 1691:1985, polias 100 A2 e 150 A2, utilizadas em um acionamento de ordenhadeira. Através de cálculos foi realizado o dimensionamento desse acionamento por polias e, foram determinados os respectivos esforços ao qual essa transmissão será exigida. Através da simulação virtual dos projetos pelo método de análise por elementos finitos, além da análise da viabilidade técnica para a fabricação dessas polias, foram realizadas simulações com o objetivo de buscar a otimização desses projetos de polias, para que as mesmas suportem os esforços ao qual são submetidas com uma menor massa possível, visando um projeto eficaz com o melhor custo benefício. Desde que se tenham todos os dados necessários para o dimensionamento de uma transmissão, a análise pelo método de elementos finitos representa uma ótima alternativa para o desenvolvimento e aperfeiçoamento de produtos e também, para a validação de um projeto, proporcionando benefícios como a redução de custos e de tempo na elaboração do projeto, aumento da produtividade, facilidade na detecção de erros e auxiliando na identificação de soluções. Nesse estudo de otimização foi possível reduzir a massa da polia motora 100 A2 em 45% e, reduzindo seu valor de venda de mercado em 29,34%. Para a polia movida 150 A2 foi possível alcançar uma redução de 51,81% da massa, reduzindo mais da metade da sua massa, e diminuindo o seu valor de venda de mercado em 29,27% em relação ao projeto inicial.

Palavras-chave: Otimização; Polia; Redução de custos; GG-15; Elementos finitos.

1 INTRODUÇÃO

Devido a crescente evolução tecnológica das máquinas e equipamentos no mercado em que estamos inseridos, a busca por pesquisa e desenvolvimento de produtos que satisfaçam o cliente e, que ao mesmo tempo tenham um custo de produção menor possível, tornou-se cada vez mais constantes nos processos de fabricação, portanto é necessário ter projetos eficazes com o melhor custo benefício.

¹ Graduando em Engenharia Mecânica. E-mail: juliano.vassoler@vassollerrepresentacoes.com.br

² Prof. Dr. Eng. Luiz Carlos de Cesaro Cavaler. E-mail: luiz.cavaler@satc.edu.br

A busca constante por melhorias nos projetos, processos e produtos são fundamentais para que a empresa esteja sempre aumentando a sua competitividade, principalmente no mercado de fundições, devido a quantidade de empresas que estão inseridas nesse ramo. As otimizações proporcionam a diminuição nos custos de fabricação, mantendo a garantia, e aumentando a qualidade final do produto, e dessa forma, a empresa tem o seu crescimento no mercado.

As indústrias fabricantes de ordenhadeiras utilizam nas unidades de vácuos os acionamentos por polias e correias em V. Esse tipo de transmissão é considerado uma aplicação leve, porém, como geralmente são utilizadas as polias da linha padrão nesses equipamentos, essas transmissões acabam ficando superdimensionadas para esse tipo de aplicação, devido a estrutura das polias padrão. Com isso, devido a competitividade do mercado com os outros fabricantes de polias, sempre é necessário buscar alternativas eficientes que satisfaçam a necessidade do cliente com um melhor custo benefício para que seja possível realizar o fornecimento dos produtos.

As polias aplicadas em setores com transmissões leves são produzidas geralmente visando apenas uma condição, que é desenvolver um projeto otimizado e, que suporte os esforços ao qual serão submetidas. Mas, além disso, estes projetos também podem passar por estudos visando melhorar a sua eficiência, e reduzir os seus custos de produção. Um dos principais fatores que influenciam no custo de peças fundidas é a sua massa, pois quanto mais pesada a peça for, maior será o seu custo, com isso qualquer medida que proporcione uma melhoria e redução de massa no projeto é fundamental, pois o impacto no valor final do produto pode ser significativo.

Aplicando os estudos embasados nos acionamentos por polias e correias, a mecânica dos materiais e os cálculos através de elementos finitos, essa pesquisa tem por objetivo desenvolver polias otimizadas para os fabricantes de ordenhadeiras, fazendo o dimensionamento destas polias, para que as mesmas suportem os esforços a qual são aplicadas com uma menor massa, visando um projeto eficaz com o melhor custo benefício.

2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

Essa seção tem como finalidade apresentar uma revisão da literatura, com isso reuniu-se o maior número de informações necessárias consideradas mais

importantes para o embasamento teórico do trabalho, com ênfase nos seguintes tópicos: ferro fundido cinzento GG-15, polias e correias, fator de segurança, ordenhadeiras e elementos finitos.

2.1 FERRO FUNDIDO CINZENTO GG-15

O ferro fundido é uma liga ferro-carbono-silício, de teores de carbono geralmente acima de 2,0%, em quantidade superior à que é retida em solução sólida na austenita, de modo a resultar carbono parcialmente livre, na forma de lamelas de grafita ou veios. O ferro fundido cinzento é o tipo de ferro mais utilizado, esse tipo de ferro apresenta uma faixa de limite de resistência à tração variando de 100 a 400 MPa, sem alongamento expressivo, além de excelente usinabilidade (Chiaverini, 2005).

O ferro fundido cinzento GG-15 é a classe de ferro fundido mais utilizada na fabricação de polias, com excelente fundibilidade e melhor usinabilidade. A grande maioria das polias são fabricadas com esse material, pelo motivo de suas propriedades mecânicas resistirem aos respectivos esforços ao qual as peças serão aplicadas e também principalmente em relação ao seu custo de fabricação, sendo um dos ferros fundidos com o preço de venda mais baixo no indicativo de custos.

2.2 POLIAS E CORREIAS

A polia é um componente mecânico amplamente utilizada na construção de máquinas e equipamentos de diversos segmentos do mercado, que juntamente com a correia são elementos importantes de transmissão. A polia é utilizada com a finalidade de transferir força e movimento, elemento mecânico circular, com ou sem canais periféricos, que é acoplada a eixos. Acionada por uma correia, a polia gira em conjunto com um eixo, transferindo o movimento e energia a outro eixo da máquina (Shigley, 2001).

A correia é um elemento de máquina que tem a finalidade de transmitir o movimento de um eixo para outro através das polias. Dentre os diversos tipos de correias, as planas e as trapezoidais, que também é conhecida como correia em V, são os modelos mais utilizados nas máquinas e equipamentos, e devido ao efeito de cunha, as correias trapezoidais apresentam um menor escorregamento do que as

correias planas. As correias de transmissão são utilizadas para a movimentação de acionamentos que requerem desde força e velocidade até sincronismo de movimento e/ou ambas (Shigley, 2001).

Nas aplicações de transmissões utilizadas nas ordenhadeiras, a grande maioria dos fabricantes utilizam polias de ferro fundido cinzento GG-15 em conjunto com correias trapezoidais perfil A, pelo fato de resistirem aos esforços ao qual a transmissão será exigida e também, principalmente em relação ao custo de fabricação, que possuem os preços melhores para a aquisição desses materiais.

2.3 FATOR DE SEGURANÇA

O fator de segurança, também conhecido como coeficiente de segurança, pode ser expresso de diversas formas e esse fator tipicamente é a razão entre duas quantidades que possuem as mesmas unidades, como resistência/tensão atuante, esforço crítico/esforço aplicado, esforço que quebra a peça/esforço esperado em serviço. A forma de expressão do fator de segurança geralmente pode ser selecionada com base no tipo de esforço que será exercido sobre a peça (Norton, 2013).

Uma estratégia chave de um projeto que está sendo desenvolvido é principalmente evitar a falha de uma estrutura, através da previsão e da correção de cenários de falhas potenciais no estágio de projeto, antes que o mesmo seja construído. Realizar a identificação do possível motivo da falha e selecionar o melhor material disponível é de grande importância na definição das formas e dimensões dos componentes do projeto (Collins, 2006).

De acordo com Norton (2013), é possível estabelecer o valor do fator de segurança através da Eq. (1):

$$F_s = \frac{\sigma_{adm}}{\sigma_{max}} \quad [---] \quad (1)$$

De acordo com Molgero (2012), em um modelo de polia de ferro fundido utilizada em britador cônico, o projeto inicial estava superdimensionado e com um fator de segurança de 25. Realizando os cálculos da transmissão e esforços atuantes, modelamento da peça e, simulações através do método de elementos finitos, partindo

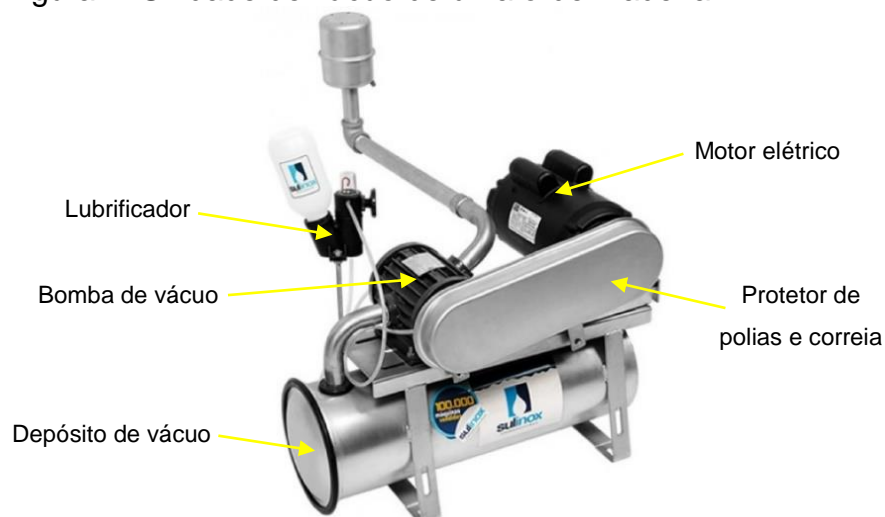
do modelo inicial, foram realizadas otimizações nesse projeto com a finalidade de fazer um novo projeto de polia otimizada com uma menor massa possível, desenvolvendo um projeto final com o fator de segurança de 5 e com uma estrutura resistente aos esforços submetidos.

2.4 ORDENHADEIRAS

As ordenhadeiras são equipamentos utilizados nas propriedades leiteiras e responsáveis por realizar a retirada do leite dos animais através da diferença de pressão com o uso da alternância de vácuo, sem contato direto do leite com ambiente externo, ou ao menos reduzindo esse tempo de contato, bem com sua manipulação. Os tipos de ordenhadeiras mais utilizados nas propriedades leiteiras são os modelos de leite canalizado e balde ao pé. O modelo de leite canalizado é o método utilizado em grandes produtores, aonde o leite é transportado direto do úbere até o resfriador. O modelo de balde ao pé é indicado para pequenos produtores, aonde o leite é retirado em um balde vedado sob pressão, e requer a necessidade de transporte e filtragem do leite para colocação nos tanques de resfriamento (Cembranelli, 2012).

Na ordenhadeira as polias e a correia ficam localizadas na unidade de vácuo. A unidade de vácuo é composta pelo depósito de vácuo, lubrificador para a bomba de vácuo, bomba de vácuo, que é o componente mais importante da ordenhadeira, motor elétrico e válvula reguladora, conforme apresentado na Fig. 1.

Figura 1: Unidade de vácuo de uma ordenhadeira.



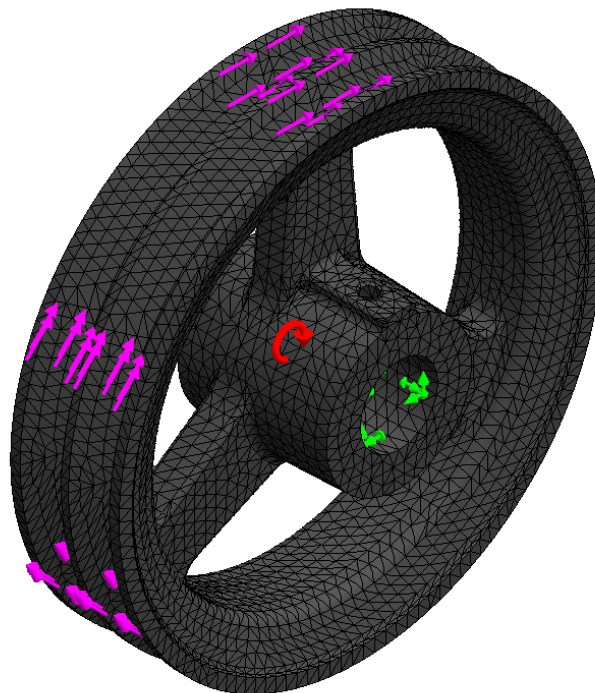
Fonte: Adaptado de Sulinox (2018).

2.5 ELEMENTOS FINITOS

Diariamente nas atividades de engenharia os projetistas deparam-se diante de problemas técnicos, alguns simples e outros mais complexos, tendo que resolvê-los de forma eficiente e satisfatória. Em particular na área de cálculos estruturais, deve-se garantir que a estrutura do projeto não estará sujeita a falhas sob as mais diversas condições de operação. Os subsídios para ter essa garantia do projeto são obtidos geralmente a partir da resistência dos materiais, que trata da resistência e da rigidez dos elementos das estruturas, fundamentando-se nos teoremas da mecânica geral, principalmente nos estudos da estática (Alves, 2003).

A análise de elementos finitos consiste em dividir um objeto real em uma malha com um grande número de elementos finitos, como pequenos elementos volumétricos, que interagem uns com os outros, conforme apresentado na Fig. 2. As equações matemáticas auxiliam a prever o comportamento de cada elemento e, em seguida o *software* soma todos os comportamentos individuais para prever o comportamento do objeto, expondo as regiões mais solicitadas, facilitando assim o redimensionamento e ajuste até atingir o projeto desejado (Autodesk, 2018).

Figura 2: Polia com malha de elementos finitos aplicada.



Fonte: Autor (2018).

Para realizar o desenvolvimento desse método é necessário que sejam efetuadas as seguintes etapas: modelamento do projeto, definição das propriedades do material, criação da malha, aplicação das condições de contorno (restrições) e dos esforços, e por fim a análise numérica (Nakasone, 2004).

A análise estrutural pelo método dos elementos finitos fornece os resultados de tensão, deformação de uma estrutura, equipamento ou produto sob análise. Os resultados fornecidos com a análise são utilizados para identificar a durabilidade do componente, identificar pontos de concentração de tensão, entender o comportamento da estrutura diante de um carregamento e realizar a otimização de peças antes mesmo de fabricá-las (Amuchastegui, 2016).

De acordo com Molgero (2012), realizando o redimensionamento de um modelo de polia utilizada em britador cônico através do método dos elementos finitos, partindo do modelo inicial que estava sendo utilizado, foram realizados os modelamentos e simulações aonde as cotas da espessura dos alívios e tamanho dos furos de alívios foram alterados, até alcançar o limite de segurança estipulado, obtendo uma redução de 38,5% entre a massa do modelo inicial e do modelo final, reduzindo um total de 178 kg.

Segundo Rigoletto *et al.* (2013) em um projeto de estudo da otimização da polia do alternador para motores automotivos baseado através do método dos elementos finitos, com o novo *desing* da polia, obteve-se uma redução de massa de 47% quando comparado com a polia do modelo inicial, conseguindo também uma redução no custo de fabricação dessa peça de 33%.

3 PROCEDIMENTO EXPERIMENTAL

Nesse trabalho foi realizado um estudo de dimensionamento de dois projetos de polias de ferro fundido cinzento GG-15 que são utilizadas em um modelo de transmissão dos fabricantes de ordenhadeiras. Foram desenvolvidos projetos otimizados para suportar os esforços a qual são aplicados com uma menor massa. Os dois modelos de polias estudadas são as polias de ferro diâmetros 100 A2 e 150 A2, polias motora e movida, respectivamente, aonde ambas formam um conjunto de transmissão. Primeiramente foram realizados os respectivos cálculos da transmissão do equipamento, para verificar e garantir que essas polias e correias que estão sendo

utilizadas atualmente no equipamento estão de acordo com o projeto. Em seguida foram encontrados os respectivos esforços atuantes nessa transmissão aonde os mesmos foram utilizados posteriormente nas análises de elementos finitos. Posteriormente iniciou-se os primeiros modelamentos desses dois modelos de polias, e em seguida foram realizadas as respectivas simulações CAE através do recurso *Simulation* do *SolidWorks®*. Desta forma, foram realizados outros modelamentos e simulações e, foram realizadas novas análises nos projetos, buscando as otimizações até alcançar nos dois projetos as menores massas possíveis com fatores de segurança satisfatórios para a produção das peças.

3.1 EQUIPAMENTO EM ESTUDO

O equipamento que é aplicada as polias em estudo é uma ordenhadeira, sendo as polias utilizadas na unidade de vácuo desse equipamento. Os fabricantes possuem diversos modelos de ordenhadeiras em suas linhas de produtos, aonde normalmente cada modelo de equipamento possui um conjunto de polias diferentes. Os dois modelos de polias selecionadas para o estudo em questão são as polias que a grande parte dos fabricantes desses equipamentos utilizam em alguma transmissão. Os dados necessários para o dimensionamento da transmissão para essa aplicação são apresentados na tabela Tab. 1 e, são apresentadas as características técnicas do equipamento importantes ao estudo das polias.

Tabela 1: Características da transmissão em ordenhadeira.

Dados	Valores
Diâmetro da Polia Motora (mm)	100
Diâmetro da Polia Movidada (mm)	150
Rotação da Polia Motora (rpm)	1.760
Rotação da Polia Movidada (rpm)	1.173,33
Potência do Motor Elétrico 4 Polos (cv)	3
Entre Centro das polias (mm)	350

Fonte: Do autor (2018).

3.2 CÁLCULOS DA TRANSMISSÃO

O dimensionamento das correias aplicadas nessa transmissão é definido pelas equações que serão apresentadas a seguir no decorrer dos procedimentos realizados desse estudo.

3.2.1 Potência projetada

De acordo com Melconian (2009), a potência projetada do equipamento é encontrada através das informações da potência do motor e fator de serviço, e é definida conforme Eq. (2):

$$P_p = P \times F_{sv} \quad [cv] \quad (2)$$

3.2.2 Fator de serviço

De acordo com Melconian (2009), o fator de serviço é definido através das características da máquina em consideração, mediante as informações da máquina conduzida e condutora do projeto, e também da quantidade de horas de trabalho. Nas aplicações em ordenhadeiras, com serviço normal de 8 á 10 horas diárias, o fator de serviço é de 1,1.

3.2.3 Perfil da correia e diâmetros das polias

Através das informações da potência projetada e rotação do eixo mais rápido do equipamento é possível definir o perfil da correia mais adequado para o projeto. O diâmetro externo mínimo recomendado para a polia é determinado em função da potência do motor e rotação do eixo mais rápido, definindo assim o diâmetro da polia motora. Com as informações do diâmetro da polia motora e relação de transmissão, é possível determinar o diâmetro externo da polia movida (Melconian 2009).

3.2.4 Comprimento da correia

Segundo Melconian (2009), o comprimento da correia depende do diâmetro de cada polia e da distância entre os centros delas. O comprimento da correia é definido conforme Eq. (3):

$$L = 2 \times C + 1,57(D + d) + \frac{(D - d)^2}{4 \times C} \quad [\text{m}] \quad (3)$$

3.2.5 Ajuste da distância entre centros

Após a realização do cálculo do comprimento das correias, na maioria dos casos esse valor obtido não se encaixa em nenhuma medida de correia comercial, entretanto as medidas ficam próximas. Com isso é necessário ajustar a distância entre os centros das polias para a utilização de um modelo de correia comercial no projeto. Segundo Melconian (2009), o ajuste da distância entre centros das polias é definido conforme Eq. (4):

$$C_a = \frac{L_c - h \times (D - d)}{2} \quad [\text{m}] \quad (4)$$

3.2.6 Comprimento de ajuste da correia

Segundo Melconian (2009), o comprimento de ajuste da correia consiste no comprimento da correia que não está em contato com as polias, e é definido conforme Eq. (5):

$$L_a = L_c - 1,57 \times (D + d) \quad [\text{m}] \quad (5)$$

3.2.7 Fator de correção

De acordo com Melconian (2009), o fator de correção da distância entre centros é definido conforme Eq. (6).

$$h = \frac{(D - d)}{L_a} \quad [---] \quad (6)$$

3.2.8 Capacidade de transmissão por correia

Com as informações dos diâmetros das polias e perfil de correia já selecionados, é possível determinar a capacidade de transmissão por correia e com isso definir a quantidade de correias necessárias no projeto. De acordo com Melconian (2009), a capacidade de transmissão por correia é definida conforme Eq. (7), e a quantidade de correias necessárias no projeto é definida conforme Eq. (8):

$$P_{pc} = (P_b + P_a) \times F_{cc} \times F_{cac} \quad [cv] \quad (7)$$

$$N_c = \frac{P_p}{P_{pc}} \quad [---] \quad (8)$$

3.2.8 Velocidade periférica da correia

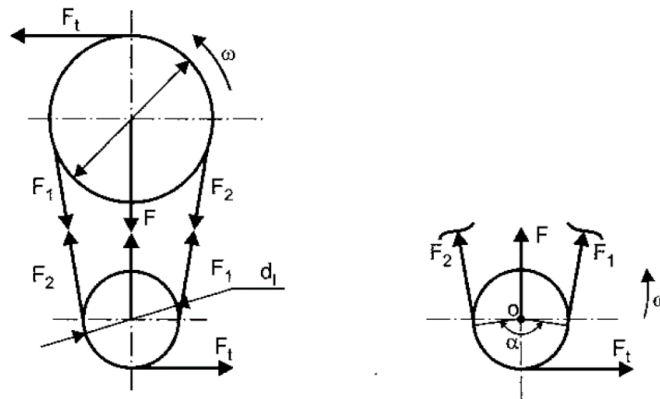
De acordo com Melconian (2009), a velocidade periférica da correia é definida conforme Eq. (9):

$$V_p = \frac{\pi \times r_1 \times n_1}{30} = \frac{\pi \times r_2 \times n_2}{30} \quad [m/s] \quad (9)$$

3.3 ESFORÇOS NA TRANSMISSÃO

De acordo com Melconian (2009), os esforços atuantes em um par de polias qualquer estão apresentados conforme Fig. 3:

Figura 3: Esforços na transmissão.



Fonte: Adaptado de Melconian (2009, p. 75).

O motor aciona uma transmissão através da força F_1 , porém em qualquer tipo de transmissão, existem as perdas provocadas por oposição ao movimento, que são as forças resistivas que se englobam em F_2 . Da soma vetorial dessas duas forças F_1 e F_2 , resulta a força tangencial F_T , que é na realidade a força resultante responsável pelo movimento do conjunto (Melconian, 2009).

3.3.1 Torque máximo do motor

De acordo com Melconian (2009), a determinação dos torques máximos atuantes em cada elemento, define a força máxima a qual será solicitada a estrutura da peça. O torque máximo do motor na polia é definido conforme Eq. (10):

$$M_{TM} = \frac{30 \times P}{\pi \times n} \quad [\text{Nm}] \quad (10)$$

3.3.2 Força tangencial

A força tangencial é única na transmissão, com isso é possível determinar a mesma por meio da polia motora ou da polia movida (Melconian, 2009). A força tangencial é definida conforme Eq. (11). A força motriz F_1 e a força resistiva F_2 são definidas conforme Eq. (12) e Eq. (13). A força resultante F da transmissão é definida conforme Eq. (14).

$$F_T = \frac{M_{TM1}}{r_1} = \frac{M_{TM2}}{r_2} \quad [\text{N}] \quad (11)$$

$$\frac{F_1}{F_2} = e^{\mu \times \alpha_{rad}} \quad [---] \quad (12)$$

$$F_1 - F_2 = F_T \quad [\text{N}] \quad (13)$$

$$F = \sqrt{F_1^2 + F_2^2 + 2 \times F_1 \times F_2 \times |\cos \alpha|} \quad [\text{N}] \quad (14)$$

3.3.3 Torques nas polias motora e movida

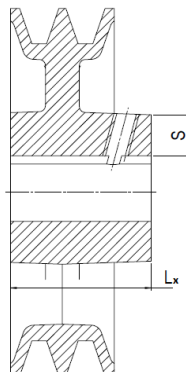
De acordo com Melconian (2009), para as transmissões mecânicas por correias, o torque é definido por meio do produto entre a força tangencial e o raio da polia conforme Eq. (15):

$$M_{TP} = F_T \times r \quad [\text{Nm}] \quad (15)$$

3.4 DIMENSIONAMENTO DO CUBO

De acordo com Melconian (2009), é possível realizar o dimensionamento do cubo de uma polia determinando o comprimento do cubo L_x e a espessura do cubo S , apresentados conforme Fig. 4.

Figura 4: Dimensionamento do cubo.



Fonte: Do autor (2018).

O comprimento do cubo da polia é definido conforme Eq. (16) e a espessura do cubo é definida conforme Eq. (17).

$$L_x = 2 \times F_x \times \sqrt[3]{M_{TM}} \quad [\text{m}] \quad (16)$$

$$S = 2 \times F_y \times \sqrt[3]{M_{TM}} \quad [\text{m}] \quad (17)$$

Segundo Melconian (2009), no dimensionamento dos cubos de polias fabricadas em ferro fundido cinzento, nos fatores de serviço F_x e F_y , para determinar o comprimento do cubo devem ser utilizados fatores que fiquem dentro do intervalo de 0,53 até 0,70 para F_x e, para F_y devem ser utilizados fatores que fiquem dentro do intervalo de 0,18 até 0,21 para encontrar a espessura do cubo.

3.5 VALIDAÇÃO ESTRUTURAL DAS POLIAS ATRAVÉS DO MÉTODO DE ELEMENTOS FINITOS

Todo projeto desenvolvido deve ser cuidadosamente pensado na relação custo benefício, garantindo sempre a qualidade e resistência aos produtos, com isso se faz necessário à validação estrutural dos projetos através da análise de malhas por elementos finitos. Após encontrar os respectivos esforços atuantes na transmissão, foram iniciados os primeiros modelamentos dessas polias, e posteriormente foram realizadas as respectivas simulações CAE através do recurso *Simulation* do *SolidWorks®*.

Para a análise de malha e a realização das simulações dos projetos das polias no *SolidWorks®* foram consideradas as seguintes condições de contorno:

- a) Foram realizadas as análises do tipo estática. O ângulo de abraçamento das correias na polia é de 172° , aplicando a força tangente dividido em quatro pontos dos canais, equidistantes dentro do arco mencionado;
- b) Foi utilizado o material DIN GG-15, encontrado na biblioteca do *SolidWorks®*;
- c) O ponto de geometria fixa foi aplicado na superfície do furo em contato com o eixo sob o qual a polia será montada;
- d) Foi utilizado malha de alto grau de refinamento.

O processo de modelamento e simulações dos projetos foram realizados quatro vezes para cada projeto de polia, até alcançar os resultados finais, de projetos otimizados com as menores massas possíveis, e com fatores de segurança satisfatórios para a produção das peças.

4 RESULTADOS E ANÁLISES

O estudo das otimizações dos dois projetos de polias de ferro obteve resultados significativos e procedeu de maneira esperada, de forma que as otimizações baseadas nos cálculos e simulações realizadas alcançaram uma redução da massa das polias em comparação com os atuais projetos que estavam sendo utilizados, e conseqüentemente proporcionando também a redução de custos.

4.1 CÁLCULOS DA TRANSMISSÃO

Os cálculos necessários para o dimensionamento da transmissão foram realizados por meio das equações demonstradas no decorrer do estudo, e os seus respectivos resultados são apresentados na tabela Tab. 2.

Tabela 2: Cálculos da transmissão.

Entradas	Equações	Saídas
$P = 3 \text{ cv}; F_{sv} = 1,1$	$P_p = P \times F_{sv}$	$P_p = 3,3 \text{ cv}$
$C = 350 \text{ mm}; D = 150 \text{ mm};$ $d = 100 \text{ mm}.$	$L = 2 \times C + 1,57(D + d) + \frac{(D - d)^2}{4 \times C}$	$L = 1.094,29 \text{ mm}$ Correia A42
$L_c = 1.100 \text{ mm}; D = 150 \text{ mm};$ $d = 100 \text{ mm}$	$L_a = L_c - 1,57 \times (D + d)$	$L_a = 707,5 \text{ mm}$
$D = 150 \text{ mm}; d = 100 \text{ mm};$ $L_a = 707,5 \text{ mm}$	$h = \frac{(D - d)}{L_a}$	$h = 0,035$
$L_a = 707,5 \text{ mm}, h = 0,035;$ $D = 150 \text{ mm}; d = 100 \text{ mm}$	$C_a = \frac{L_a - h \times (D - d)}{2}$	$C_a = 352,88 \text{ mm}$
$P_b = 2,90 \text{ cv}; P_a = 0,33 \text{ cv};$ $F_{cc} = 0,87; F_{ca} = 0,98$	$P_{pc} = (P_b + P_a) \times F_{cc} \times F_{cac}$	$P_{pc} = 2,75 \text{ cv}$
$P_p = 3,3 \text{ cv}; P_{pc} = 2,75 \text{ cv}$	$N_c = \frac{P_p}{P_{pc}}$	$N_c = 1,2$ 2 correias A
$r_1 = 0,05 \text{ m}; n_1 = 1.760 \text{ rpm}$	$V_p = \frac{\pi \times r_1 \times n_1}{30} = \frac{\pi \times r_2 \times n_2}{30}$	$V_p = 9,22 \text{ m/s}$

Fonte: Do autor (2018).

Com a realização dos cálculos e analisando os resultados que foram obtidos através deles, pode-se verificar que nessa aplicação a potência transmitida por correia do modelo A42 é de 2,75 cv e, a potência projetada da ordenhadeira é de 3,3 cv. De acordo com os cálculos, para transmitir a potência exigida nessa transmissão é necessária 1,2 correia, dessa forma deve-se utilizar duas correias do modelo A42 nessa aplicação e com a medida do entre centros das polias de 352,88 mm.

Essas polias de ferro fundido cinzento GG-15 nos diâmetros de 100 A2 e 150 A2 que estão sendo utilizadas atualmente no equipamento, polias motora e movida, respectivamente, conforme resultados obtidos essas polias estão de acordo com o projeto da ordenhadeira.

4.2 ESFORÇOS NA TRANSMISSÃO

Os cálculos necessários para determinar os esforços dessa transmissão foram realizados por meio das equações e figuras que demonstraram os respectivos esforços atuantes na transmissão, e os seus respectivos resultados são apresentados na tabela Tab. 3.

Tabela 3: Esforços na transmissão.

Entradas	Equações	Saídas
$P = 2.206,5 \text{ W}; n_1 = 1.760 \text{ rpm}$	$M_{TM} = \frac{30 \times P}{\pi \times n}$	$M_{TM1} = 11,97 \text{ Nm}$ Polia Motora
$P = 2.206,5 \text{ W};$ $n_2 = 1.173,33 \text{ rpm}$	$M_{TM} = \frac{30 \times P}{\pi \times n}$	$M_{TM2} = 17,96 \text{ Nm}$ Polia Movida
$M_T = 11,97 \text{ Nm}; r_1 = 0,05 \text{ m}$	$F_T = \frac{M_{TM1}}{r_1} = \frac{M_{TM2}}{r_2}$	$F_T = 239,4 \text{ N}$
$\mu = 0,25; \alpha = 3 \text{ rad}$	$\frac{F_1}{F_2} = e^{\mu \times \alpha}$	$F_2 = 214,32 \text{ N}$
$F_T = 239,4 \text{ N}; F_2 = 214,32 \text{ N}$ $F_1 = 453,72 \text{ N}; F_2 = 214,32 \text{ N};$ $\alpha = 172 \text{ graus}$	$F_1 - F_2 = F_T$ $F = \sqrt{F_1^2 + F_2^2 + 2 \times F_1 \times F_2 \times \cos \alpha }$	$F_1 = 453,72 \text{ N}$ $F = 666,62 \text{ N}$
$F_T = 239,4 \text{ N}; r = 0,05 \text{ m}$	$M_{TP1} = F_T \times r$	$M_{TP1} = 11,97 \text{ Nm}$ Polia Motora
$F_T = 239,4 \text{ N}; r = 0,075 \text{ m}$	$M_{TP2} = F_T \times r$	$M_{TP2} = 17,96 \text{ Nm}$ Polia Movida

Fonte: Do autor (2018).

Com a conclusão dos cálculos dos esforços atuantes na transmissão e analisando os resultados que foram obtidos através deles, foram determinadas as forças atuantes nas polias motora e movida, aonde por meio desses valores obtidos os mesmos foram utilizados nas simulações dos projetos na análise pelo método de elementos finitos.

4.3 DIMENSIONAMENTO DO CUBO

Os cálculos necessários para realizar o dimensionamento dos cubos das polias 100 A2 e 150 A2 foram realizados por meio das equações demonstradas no decorrer do estudo, e os seus respectivos resultados são apresentados na tabela Tab. 4.

Tabela 4: Dimensionamento dos cubos.

Entradas	Equações	Saídas
$F_x = 0,70;$ $M_{TM1} = 11970 \text{ Nmm}$	$L_x = 2 \times F_x \times \sqrt[3]{M_{TM}}$	$L_{x1} = 32,03 \text{ mm}$ Polia Motora
$F_x = 0,70;$ $M_{TM2} = 17960 \text{ Nmm}$	$L_x = 2 \times F_x \times \sqrt[3]{M_{TM}}$	$L_{x2} = 36,66 \text{ mm}$ Polia Movida
$F_y = 0,21;$ $M_{TM1} = 11970 \text{ Nmm}$	$S = 2 \times F_y \times \sqrt[3]{M_{TM}}$	$S_1 = 9,61 \text{ mm}$ Polia Motora
$F_x = 0,21;$ $M_{TM2} = 17960 \text{ Nmm}$	$S = 2 \times F_y \times \sqrt[3]{M_{TM}}$	$S_2 = 11 \text{ mm}$ Polia Movida

Fonte: Do autor (2018).

Com a conclusão dos cálculos do dimensionamento dos cubos das polias motora e movida do acionamento, foram encontrados os respectivos comprimentos e espessuras necessários para os modelamentos dos cubos nos projetos das polias no *SolidWorks®*.

4.4 SIMULAÇÕES

Os modelamentos dos dois projetos de polias 100 A2 e 150 A2 estudados e as simulações CAE através da análise de elementos finitos foram realizados no *SolidWorks®*, no qual as simulações foram realizadas através do recurso do

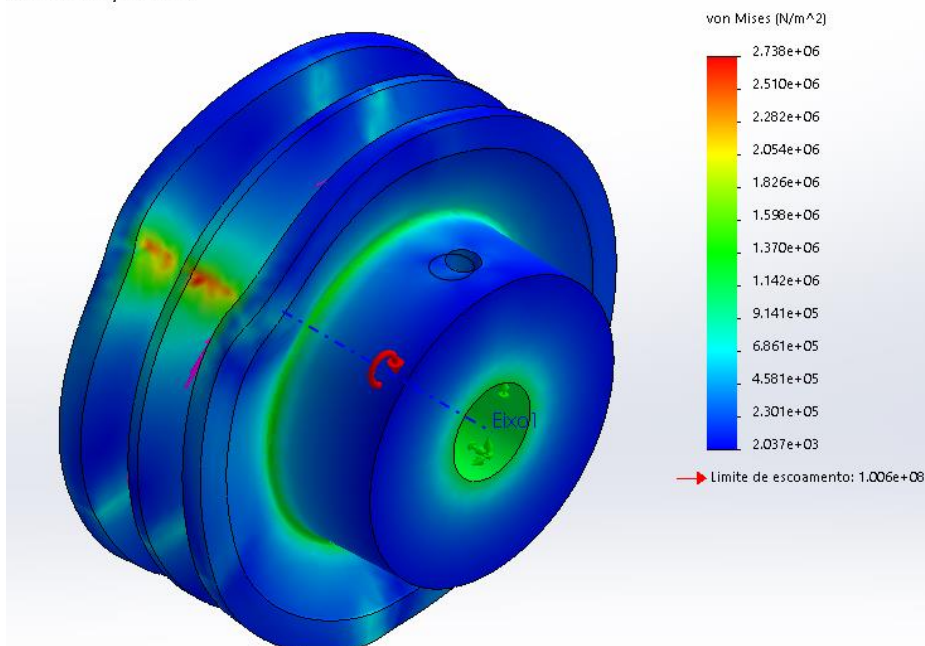
Simulation. Esse processo de modelamento e simulações foram realizados quatro vezes para cada projeto de polia, partindo inicialmente de projeto atual que estava sendo utilizado, até alcançar os resultados finais, de projetos otimizados com as menores massas possíveis, e com fatores de segurança satisfatórios para a produção das peças. De acordo com os cálculos realizados, o valor encontrado para a força tangencial nessa transmissão é de 239,4 N.

4.4.1 Simulações na polia 100 A2

A primeira simulação foi realizada na polia 100 A2 que estava sendo utilizada atualmente na transmissão, uma polia padrão, que estava superdimensionada para essa aplicação, conforme demonstrado na Fig. 5.

Figura 5: Tensão máxima gerada na polia 100 A2.

Nome do modelo: PF100A2 - Simulação
Nome do estudo: Análise estática 1(-2-A-SPA-080-)
Tipo de plotagem: Análise estática tensão nodal Tensão1
Escala de distorção: 9303,45

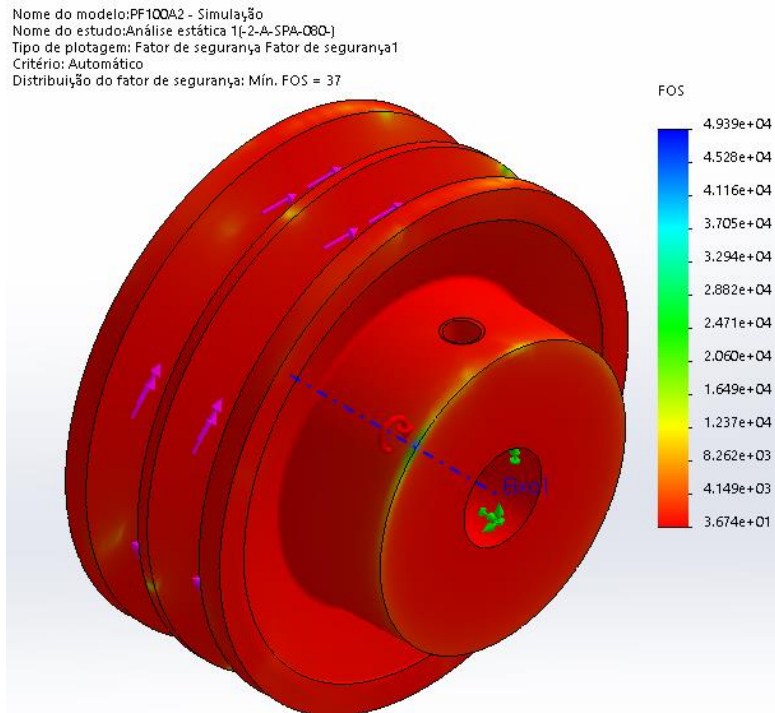


Fonte: Do autor (2018).

Pode-se verificar que a tensão máxima sofrida pela peça equivale a 2,738 MPa, enquanto que o limite de escoamento do material vale 100,59 MPa. Ou seja, a tensão máxima que a peça está sujeita, está longe de atingir o limite de energia máximo necessário para iniciar o processo de deformação plástica. De acordo com a

Eq. 1, o fator de segurança para esse projeto está 36,74, e pode ser confirmado através do registro obtido do *SolidWorks*® conforme Fig. 6.

Figura 6: Distribuição do fator de segurança pela polia 100 A2.



Fonte: Do autor (2018).

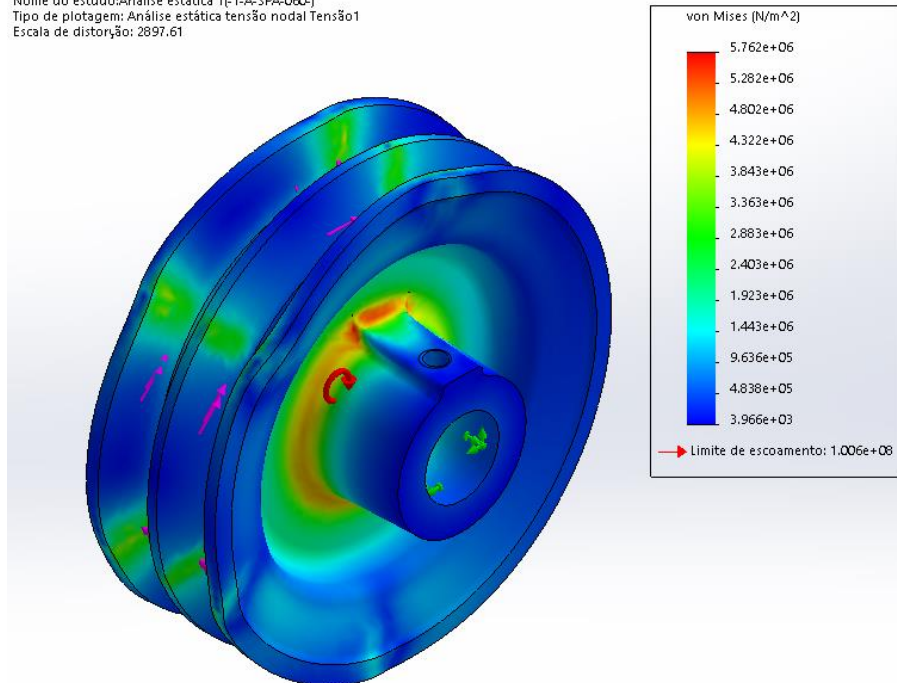
Conforme simulação realizada, foi possível comprovar que o projeto dessa polia 100 A2 estava superdimensionado, tendo uma massa final da polia pronta de 1,71 kg.

Na segunda simulação foram feitas algumas melhorias no projeto e foram realizadas as novas simulações na polia. Foi possível verificar que a tensão máxima sofrida nesse caso pela polia equivale a 3,701 MPa, tendo um fator de segurança de 27,18, com uma massa final da polia pronta de 1,35 kg. Na terceira simulação foram realizadas novas otimizações e foi possível verificar que a tensão máxima sofrida pela polia equivale a 4,493 MPa, com um fator de segurança de 22,39, e com uma massa final da polia pronta de 1,09 kg.

Na quarta simulação realizada foram feitas novas otimizações no projeto até alcançar uma polia com projeto mais otimizado e com a menor massa possível, e ao mesmo tempo favorável ao processo de fundição, conforme demonstrado na Fig. 7.

Figura 7: Tensão máxima gerada na polia 100 A2 otimizada.

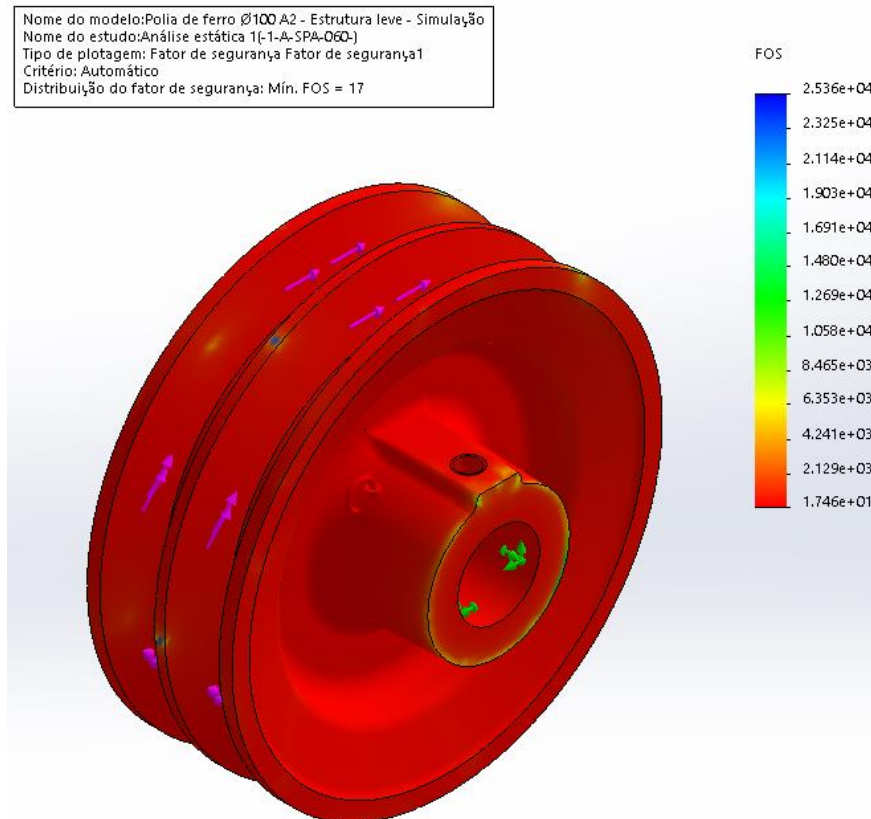
Nome do modelo: Polia de ferro Ø100 A2 - Estrutura leve - Simulação
Nome do estudo: Análise estática 1(-1-A; SPA-060)
Tipo de plotagem: Análise estática tensão nodal Tensão1
Escala de distorção: 2897,61



Fonte: Do autor (2018).

Pode-se verificar que a tensão máxima sofrida pela peça equivale a 5,762 MPa, enquanto que o limite de escoamento do material vale 100,59 MPa, tendo uma massa final da polia pronta de 0,94 kg. De acordo com a Eq. 1, o fator de segurança para esse projeto está 17,46, e pode ser confirmado através do registro obtido do *SolidWorks*® conforme Fig. 8.

Figura 8: Distribuição do fator de segurança pela polia 100 A2.

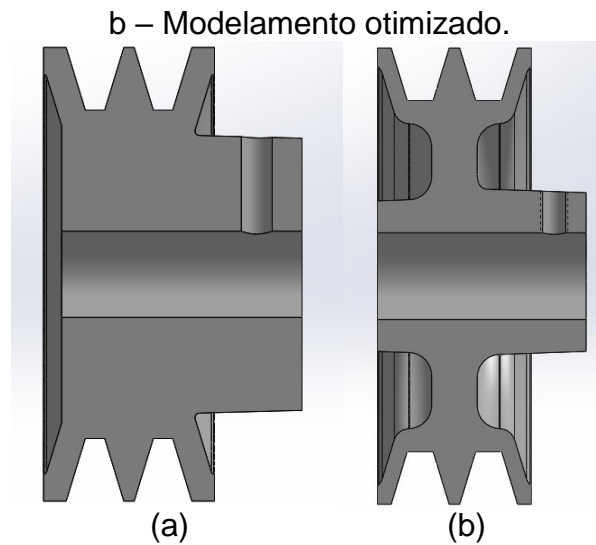


Fonte: Do autor (2018).

Analisando o fator de segurança dessa polia 100 A2 otimizada, o mesmo ainda está relativamente alto, porém como o objetivo desse estudo é determinar um projeto otimizado de polia com a menor massa possível, não se pode ganhar em massa e ao mesmo tempo perder no processo de fundição. Para a fundição de uma determinada peça, sempre é necessário verificar também a viabilidade técnica para a sua fabricação, analisando a geometria da peça e a sua respectiva dificuldade para a fundição, o rendimento metalúrgico, a taxa de refugo, os locais para serem rebarbados, e entre outras variáveis, pois esses fatores também impactam nos custos de fabricação.

No projeto inicial referente a primeira simulação que era a polia ao qual estava-se utilizando atualmente na máquina, em comparação com o projeto final que é referente a quarta simulação realizada, foi possível alcançar uma redução significativa na massa da peça, reduzindo 45% da massa, o que influenciará diretamente no custo da peça. É possível fazer uma comparação estrutural conforme Fig. 9, aonde ilustra o primeiro modelamento e o último, o mais otimizado.

Figura 9: Comparação estrutural da polia motora 100 A2: a – Modelamento inicial,



Fonte: Do autor (2018).

Os resultados obtidos com a otimização da polia motora 100 A2 de ferro fundido cinzento GG-15 são apresentados na Tab. 5.

Tabela 5: Resultados obtidos na polia 100 A2.

Simulação	Tensão – σ (MPa)	Fator de Segurança – F_s (---)	Massa – m (kg)
1	2,738	36,74	1,71
2	3,701	27,18	1,35
3	4,493	22,39	1,09
4	5,762	17,46	0,94

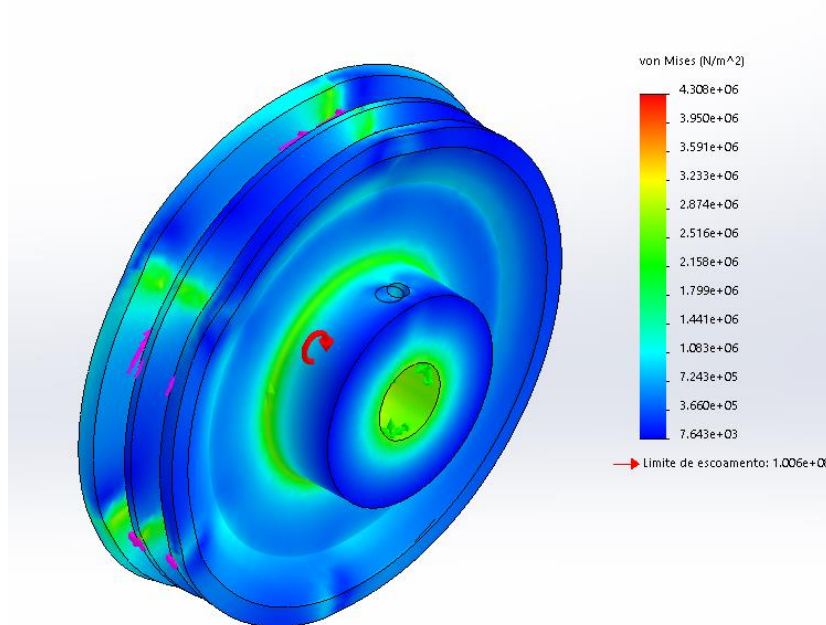
Fonte: Do autor (2018).

4.4.2 Simulações na polia 150 A2

A primeira simulação foi realizada na polia 150 A2 que estava sendo utilizada atualmente na transmissão, uma polia da linha padrão, que estava superdimensionada para essa aplicação, conforme demonstrado na Fig. 10.

Figura 10: Tensão máxima gerada na polia 150 A2.

Nome do modelo: PF150A2 - Simulação
Nome do estudo: Análise estática 1(-PF.120.A.2-)
Tipo de plotagem: Análise estática tensão nodal Tensão1
Escala de distorção: 4834,52

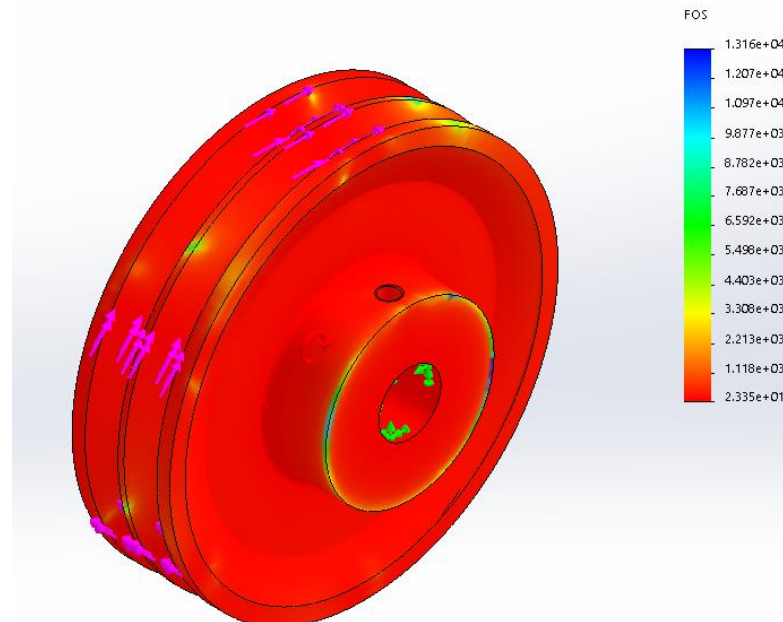


Fonte: Do autor (2018).

Pode-se verificar que a tensão máxima sofrida pela peça equivale a 4,308 MPa, enquanto que o limite de escoamento do material vale 100,59 MPa. Ou seja, a tensão máxima que a peça está sujeita, está longe de atingir o limite de energia máximo necessário para iniciar o processo de deformação plástica. De acordo com a Eq. 1, o fator de segurança para esse projeto está 23,35, e pode ser confirmado através do registro obtido do *SolidWorks*® conforme Fig. 11.

Figura 11: Distribuição do fator de segurança pela polia 150 A2.

Nome do modelo: PF150A2 - Simulação
Nome do estudo: Análise estática 1-(PF.120.A.2-)
Tipo de plotagem: Fator de segurança Fator de segurança1
Critério: Automático
Distribuição do fator de segurança: Min. FOS = 23



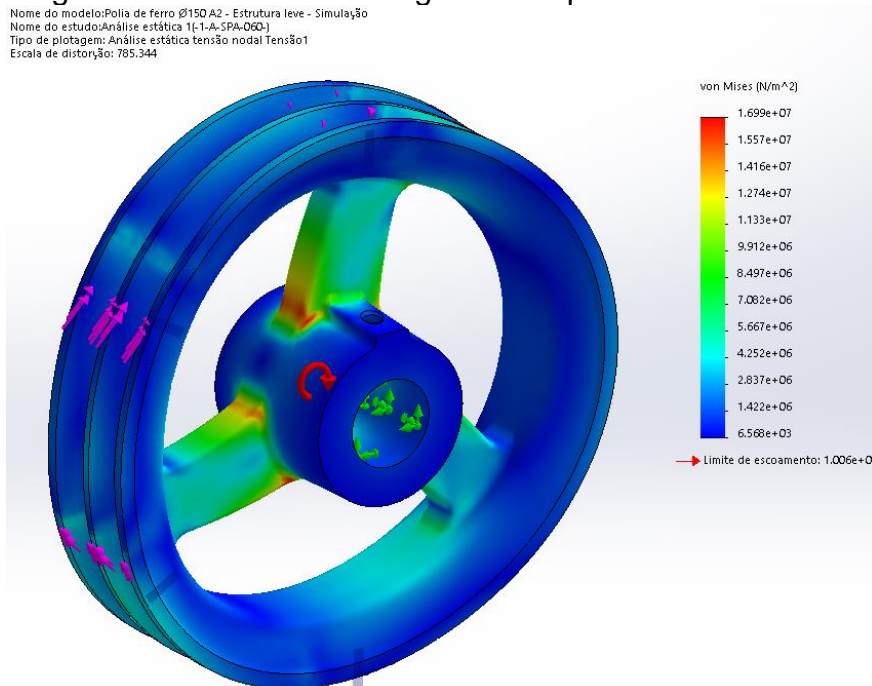
Fonte: Do autor (2018).

Conforme simulação realizada, foi possível comprovar que o projeto dessa polia 150 A2 estava superdimensionado, tendo uma massa final da polia pronta de 3,01 kg.

Na segunda simulação foram feitas algumas melhorias no projeto e foram realizadas as novas simulações na polia 150 A2. Foi possível verificar que a tensão máxima sofrida nesse caso pela polia equivale a 9,184 MPa, tendo um fator de segurança de 10,95, com uma massa final da polia pronta de 2,14 kg. Na terceira simulação foram realizadas novas otimizações e foi possível verificar que a tensão máxima sofrida pela polia equivale a 12,711 MPa, com um fator de segurança de 7,91, e com uma massa final da polia pronta de 1,70 kg.

Na quarta simulação realizada foram feitas novas otimizações no projeto até alcançar uma polia com projeto mais otimizado e com a menor massa possível, e ao mesmo tempo favorável ao processo de fundição, conforme demonstrado na Fig. 12.

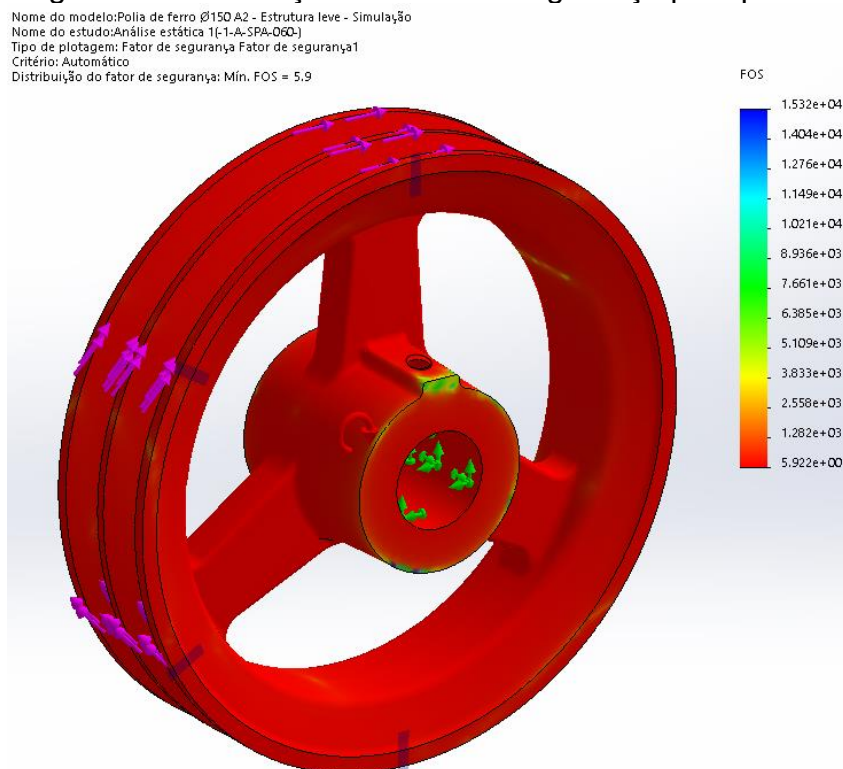
Figura 12: Tensão máxima gerada na polia 150 A2 otimizada.



Fonte: Do autor (2018).

Pode-se verificar que a tensão máxima sofrida pela peça equivale a 16,986 MPa, enquanto que o limite de escoamento do material vale 100,59 MPa, tendo uma massa final da polia pronta de 1,45 kg. De acordo com a Eq. 1, o fator de segurança para esse projeto está 5,922, e pode ser confirmado através do registro obtido do *SolidWorks*® conforme Fig. 13.

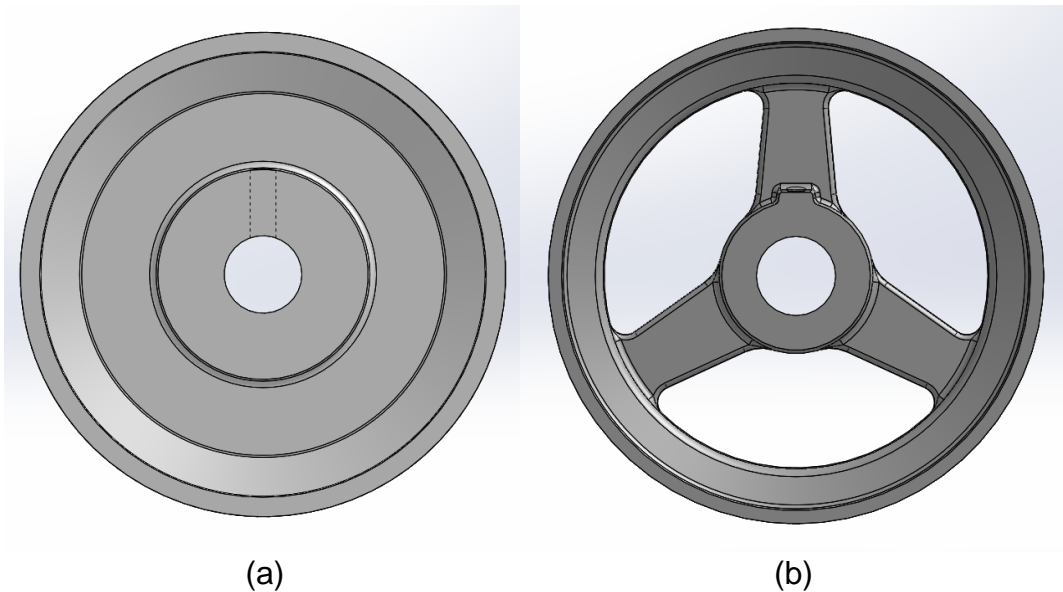
Figura 13: Distribuição do fator de segurança pela polia 150 A2.



Fonte: Do autor (2018).

No projeto inicial referente a primeira simulação que era a polia 150 A2 ao qual estava-se utilizando atualmente na máquina, em comparação com o projeto final que é referente a quarta simulação que foi realizada, foi possível alcançar uma redução significativa na massa da peça, reduzindo 51,81% da massa, o que influenciará diretamente no custo da peça. É possível fazer uma comparação estrutural conforme Fig. 14, aonde ilustra o primeiro modelamento e o último, o mais otimizado.

Figura 14: Comparação estrutural da polia motora 150 A2: a – Modelamento inicial, b – Modelamento otimizado.



(a)
Fonte: Do autor (2018).

(b)

Os resultados obtidos com a otimização da polia movida 150 A2 de ferro fundido cinzento GG-15 são apresentados na Tab. 6.

Tabela 6: Resultados obtidos na polia 150 A2.

Simulação	Tensão – σ (MPa)	Fator de Segurança – F_s (---)	Massa – m (kg)
1	4,308	23,35	3,01
2	9,184	10,95	2,14
3	12,711	7,91	1,70
4	16,986	5,92	1,45

Fonte: Do autor (2018).

5 CONCLUSÕES

A realização dos cálculos para o dimensionamento da transmissão e dos cálculos para determinar os esforços atuantes na transmissão auxiliaram a entender o comportamento dessa transmissão, aonde através dos valores encontrados foi possível perceber inicialmente que essa aplicação é considerada uma transmissão leve.

A utilização de simulações computacionais na área da engenharia tem-se tornado fundamental para garantir a qualidade e eficiência no desenvolvimento de

produtos de engenharia. Desde que se tenham todos os dados necessários para o dimensionamento de uma transmissão, a análise pelo método de elementos finitos representa uma ótima alternativa para o desenvolvimento e aperfeiçoamento de produtos, e também para a validação de um projeto, proporcionando benefícios como a redução de custos e de tempo na elaboração do projeto, aumento da produtividade, facilidade na detecção de erros e auxiliando na identificação de soluções.

Os modelamentos dos dois projetos de polias 100 A2 e 150 A2 e as simulações CAE de análise de elementos finitos através do recurso *Simulation* do *SolidWorks®* obteve resultados significativos e procedeu de maneira esperada, de forma que as otimizações baseadas nos cálculos e simulações realizadas alcançaram uma redução da massa das polias em comparação com os atuais projetos que estavam sendo utilizados, e conseqüentemente proporcionando também a redução de custos.

Na polia de ferro 100 A2 foi possível alcançar uma redução na massa da polia de 45% em relação ao projeto que estava sendo utilizado na máquina atualmente. Essa diferença obtida na massa da peça reflete diretamente no custo de produção, aonde será necessária uma quantidade menor de material para a fundição da peça, fazendo que o valor de mercado da polia seja reduzido, melhorando a competitividade do produto. O valor de venda de mercado dessa polia 100 A2 teve uma redução de 29,34% comparado com o projeto inicial da polia padrão que estava sendo utilizado.

Na polia de ferro 150 A2 foi possível alcançar uma redução na massa da polia ainda mais significativa, reduzindo a massa dessa polia em 51,81% em relação ao projeto da polia padrão que estava sendo utilizado, reduzindo mais da metade da massa da polia. O valor de venda de mercado dessa polia 150 A2 também teve uma ótima redução, reduzindo 29,27% do valor em relação ao projeto da polia padrão que estava sendo utilizado atualmente.

O novo *design* das polias possui viabilidade técnica e econômica de fabricação, atingindo o objetivo proposto de redução de massa e redução de custo, atendendo os requisitos de funcionamento do componente.

Na busca das otimizações e melhorias das polias, além do acompanhamento do valor do fator de segurança obtido com as simulações, também é necessário verificar a geometria da peça e analisar a viabilidade da fundição desse

respectivo projeto. Pode ocorrer do projeto estar com a estrutura bem otimizada proporcionando uma ótima redução de massa, e ao mesmo tempo essa mesma peça estar tendo problemas durante o processo de fundição, com isso estará se ganhando em massa, porém ao mesmo tempo se perdendo em processo de fundição, com isso é necessário estar atento nessa parte, para o projeto ser viável e estar de acordo com os requisitos para a fundição da peça na fábrica.

REFERÊNCIAS

ALVES, Avelino. **Elementos Finitos: A Base da Tecnologia CAE**. 2. ed. São Paulo: Érica, 2003.

AMUCHASTEGUI, José. Elementos Finitos. **Ensus**, São Paulo, jan.2016. Disponível em: <<http://ensus.com.br/elementos-finitos-quais-os-beneficios/>>. Acesso em: 02 setembro 2018.

AUTODESK. **Análise de Elementos Finitos**. 2018. Disponível em: <<https://www.autodesk.com.br/solutions/finite-element-analysis>>. Acesso em: 02 setembro de 2018.

CEMBRANELLI, Marcello. Cuidados e Funcionamento de Ordenhadeiras. **Girolando**, Uberaba, dez. 2010. Disponível em: <<http://www.girolando.com.br/index.php?paginasSite/tecnico,50>>. Acesso em: 02 setembro 2018.

CHIAVERINI, Vicente. **Aços e Ferros Fundidos**. São Paulo: Associação Brasileira de Metais, 2005.

COLLINS, Jack. **Projeto Mecânico de Elementos de Máquinas: Uma Perspectiva de Prevenção de Falha**. 1. ed. Rio de Janeiro: LTC, 2006.

MELCONIAN, Sarkis. **Elementos de máquinas**. 9. ed. São Paulo: Érica, 2009.

MOLGERO, Glauco Savio. **Otimização de projetos de polias em ferro fundido nodular ABNT FE-5007 para o setor de mineração**. 2012. Trabalho de Conclusão de Curso – Faculdade SATC, Criciúma, 2012.

NAKASONE, Paulo. **Estudo de viabilidade de uma bomba de fluxo piezelétrica utilizando simulação computacional**. 2006. 154f. Dissertação (Mestrado) – Escola Politécnica, Universidade de São Paulo, São Paulo, 2006. Disponível em: <<http://www.teses.usp.br/teses/disponiveis/3/3152/tde-05092006-144728/pt-br.php>>. Acesso em: 13 setembro 2017.

NORTON, Robert. **Projeto de Máquinas: Uma Abordagem Integrada**. 4. ed. Porto Alegre: Bookman, 2013.

RIGOLETTO, Kleber et al. **Otimização da Polia do Alternador para Motores Automotivos de Veículos de Passeio**. 7º Congresso Brasileiro de Engenharia de Fabricação. 20 a 24 de maio de 2013 – Penedo, Itatiaia – RJ – Brasil

SHIGLEY, Joseph. **Mechanical Engineering Design**. 6. ed. Nova York: McGraw Hill, 2001.

SULINOX. **Ordeneadeira Balde ao Pé**. 2018. Disponível em: <<http://www.sulinox.com/index.php/produtos/ordeneadeiras/item/75-ordeneadeira-balde-ao-pe.html>>. Acesso em: 02 de setembro de 2018.

AGRADECIMENTOS

Agradeço primeiramente a Deus pelo dom da vida e por ter me proporcionado chegar até aqui. Agradeço a minha família por sempre me apoiar e incentivar a seguir carreira na área da Engenharia Mecânica. Agradeço ao professor Luiz Carlos de Cesaro Cavalier, meu orientador, pela oportunidade e apoio na elaboração deste trabalho. Agradeço também aos amigos Augusto Pasini Bratti e Glauco Savio Molgero pelo apoio e auxílios na elaboração deste trabalho.

LISTA DE SÍMBOLOS

α	[rad]	Arco de contato ou ângulo de abraçamento da correia na polia
σ_{adm}	[Pa]	Tensão admissível
σ_{max}	[Pa]	Tensão máxima de von Mises
μ	[---]	Coeficiente de atrito estático entre a correia e a polia

ω	[rad/s]	Velocidade angular
C	[m]	Distância entre centros das polias
C_a	[m]	Distância entre centros das polias ajustada
D	[m]	Diâmetro da polia maior
d	[m]	Diâmetro da polia menor
d_1	[m]	Diâmetro da polia motora
e	[---]	Base dos logaritmos neperianos
F	[N]	Força resultante
F_T	[N]	Força tangencial
F_1	[N]	Força motriz
F_2	[N]	Força resistiva
F_{cac}	[---]	Fator de correção do arco de contato
F_{cc}	[---]	Fator de correção do comprimento da correia
F_s	[---]	Fator de segurança
F_{sv}	[---]	Fator de serviço
F_x	[---]	Fator de serviço do comprimento do cubo
F_y	[---]	Fator de serviço da espessura do cubo
h	[---]	Fator de correção da distância entre centros
L	[m]	Comprimento da correia
L_a	[m]	Comprimento de ajuste
L_c	[m]	Comprimento da correia escolhida
L_x	[m]	Comprimento do cubo
L_{x1}	[m]	Comprimento do cubo da polia motora
L_{x2}	[m]	Comprimento do cubo da polia movida
M_{TM}	[Nm]	Torque do motor na polia
M_{TM1}	[Nm]	Torque do motor na polia motora
M_{TM2}	[Nm]	Torque do motor na polia movida
M_{TP}	[Nm]	Torque na polia
M_{TP1}	[Nm]	Torque na polia motora
M_{TP2}	[Nm]	Torque na polia movida
n	[rpm]	Rotação da polia
n_1	[rpm]	Rotação da polia motora

n_2	[rpm]	Rotação da polia movida
N_c	[---]	Número de correias
P	[cv]	Potência do motor
P_a	[cv]	Potência adicional
P_b	[cv]	Potência básica
P_p	[cv]	Potência projetada
P_{pc}	[cv]	Capacidade de transmissão por correia
r	[m]	Raio da polia
r_1	[m]	Raio da polia motora
r_2	[m]	Raio da polia movida
S	[m]	Espessura do cubo
S_1	[m]	Espessura do cubo da polia motora
S_2	[m]	Espessura do cubo da polia movida
V_p	[m/s]	Velocidade periférica