
**PROJETO DE UM COMPONENTE ARTICULADOR PARA O SISTEMA
DE BARRAS DE UM PULVERIZADOR AUTOPROPELIDO**

Autor 1 – Lucas Martins Pinto

139190@upf.br

Autor 2 – Prof. Dr. Márcio Walber

mwalber@upf.br

**Comissão Examinadora – Dr. Agenor Dias de Meira Junior, Dr. Carlos Edmundo de
Abreu e Lima Ipar**

RESUMO

A demanda de alimentos no mundo aumenta a cada ano, cada vez mais são necessárias máquinas agrícolas maiores e com muita tecnologia e eficiência para suprir essa necessidade. Sendo assim, este trabalho tem por objetivo apresentar um projeto de um componente fundido para o sistema de barras de um pulverizador autopropelido, substituindo o componente utilizado atualmente que é fabricado através do processo de soldagem, composto basicamente por chapas dobradas e buchas usinadas; atualmente este componente apresentou falhas em campo, impossibilitando o perfeito trabalho da máquina. Para solução do problema evidenciado a campo, apresenta-se o projeto de um novo componente que será feito pelo processo de fundição; para isso, um estudo de otimização para o componente novo foi realizado, buscando proporcionar a melhor distribuição de material para o projeto da nova peça. O resultado principal atingido com o projeto é um novo componente fundido para o sistema de barras de um pulverizador, com maior resistência mecânica e sem aumento substancial de massa, quando comparado com o componente atual.

Palavras-chave: Barras; Pulverizador; Fundição; Otimização.

1 INTRODUÇÃO

Em meados do século passado a agricultura no Brasil era pouco desenvolvida. A soja era uma novidade no Brasil, sem muita expressão no mercado interno e menos ainda no comércio internacional. Basicamente o trabalho era braçal e na produção agropecuária, naquela época, menos de 2% das propriedades rurais utilizavam máquinas agrícolas (EMBRAPA, 2021).

O rendimento por hectare era muito baixo, com isso o crescimento da agricultura obrigava que extensas áreas naturais fossem transformadas em lavouras. Mesmo assim, as fazendas não eram capazes de produzir alimento para atender a demanda nacional. Com isso o Governo instituiu políticas específicas para aumentar a produção da agricultura no país;

investindo em pesquisa, desenvolvimento, extensão rural e créditos farto, era o início da modernização da agricultura no país.

A trajetória moderna da agricultura no Brasil é resultado de uma grande combinação de fatores. O cenário para isso é um país com abundância de recursos naturais e com extensas áreas cultivadas. Produções como a da soja ganharam grande importância no cenário nacional e internacional. Certamente o aumento na produção dessa cultura está relacionado com melhoramentos em máquinas agrícolas, que vem se tornando cada vez mais importantes no cultivo da agricultura. No manejo da cultura da soja, o pulverizador cada vez mais ganhando espaço, uma vez que as intervenções durante o ciclo da cultura podem passar de 5 vezes.

O presente estudo apresenta o projeto de um componente fundido utilizado nos sistemas de barras de um pulverizador autopropeleto com capacidade máxima de 4000 litros, e tamanho máximo de barras de 36 metros, visando a substituição desse novo componente pelo antigo, que vem apresentando falhas a campo, impedindo o perfeito funcionamento da máquina.

Para que o objetivo do projeto seja atendido, o engenheiro deve fazer o uso de ferramentas experimentais, analíticas e numéricas, que se baseiam em métodos científicos bem estabelecidos, a exemplo disso pode-se citar a análise por elementos finitos (MEF), e também métodos de otimização topológica SIMP (Solid Isotropic Material with Penalization).

1.1 Objetivo geral e objetivos específicos

O presente trabalho tem como objetivo geral elaborar o projeto de um componente fundido para substituir um componente soldado que está apresentando falhas a campo em um pulverizador autopropeleto.

Os objetivos específicos são:

- Realizar um levantamento de dados de campo do índice de falhas e suas consequências;
- Realizar análise e determinação dos carregamentos sob o componente;
- Realizar simulação estrutural com vistas a otimização;
- Avaliar os ganhos com a modificação do projeto em termos de custos e resistência estrutural.

2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

É importante estudar todos os fatores envolvidos em um projeto de qualquer componente ou máquina, classificar e atender todos os requisitos que o projeto necessita. Diante da temática do projeto, neste capítulo serão abordados alguns assuntos como o método de análise por elementos finitos, os processos de fabricação envolvidos na proposta do novo componente e também um breve histórico sobre os tipos de pulverizadores, assuntos esses de grande relevância para a realização do trabalho.

2.1 Pulverizador Agrícola

Os pulverizadores são máquinas ou equipamentos utilizados para distribuir substâncias líquidas, fracionadas em minúsculas gotas, sobre o cultivo das plantas. Sendo assim, distribuem agroquímicos, nutrientes ou fertilizantes na lavoura; de forma geral, contribuem para a fácil

absorção das substâncias por parte das plantas, aplicando a quantidade correta e na mesma medida por todo o caminho percorrido (NEUFEL, 2021).

Segundo Balastraire, (2004), existem vários tipos de pulverizadores agrícolas, e para diferentes aplicações, mas os principais tipos são:

- **Pulverizador Costal**, equipamento pequeno e compacto, composto basicamente por um reservatório pequeno com alças, pode ser manual, elétrico ou a combustível, esse tipo de equipamento precisa ser carregado por um operador.
- **Pulverizador Motorizado**, tipo de equipamento que possui um motor de combustão interna, encarregado por acionar uma bomba que fornece a pressão para o líquido ser aplicado.
- **Pulverizadores Tratorizados**, neste caso, conforme mostra a Figura 1, o trator é o elemento responsável pelo fornecimento da potência para acionamento, bem como pela sustentação do equipamento.

Figura 1 - Pulverizador Tratorizado



Fonte: Stara Implementos Agrícolas SA (2021)

- **Pulverizadores Autopropelidos**, conforme mostrado na Figura 2, são máquinas especificamente projetadas e dedicadas para a aplicação de defensivos agrícolas, tendo motor e transmissão próprios, geralmente montado em um chassi com vão livre alto, para assim permitir a aplicação em diferentes estágios da cultura.

Figura 2 - Pulverizador Autopropelido



Fonte: Stara Implementos Agrícolas SA (2021)

- **Pulverizadores Aéreos**, basicamente são pulverizadores acoplados em aviões ou até mesmo em helicópteros, conforme mostrado na Figura 3.

Figura 3 - Pulverizador Aéreo



Fonte: Sana Agro, (2021)

2.1.1 Pulverizadores Autopropelidos

Pode ser considerado autopropelidos ou autopropulsados, máquinas, veículos, ou aparelhos que tem a capacidade de deslocar-se sem a necessidade de força externa, impulso ou propulsão. É o caso de veículos automotores em geral: caminhões, tratores, ônibus, escavadores, pás carregadoras, niveladores, máquinas e máquinas para pulverização.

Atualmente, no mercado brasileiro, existem inúmeras marcas e modelos de pulverizadores autopropelidos que basicamente diferenciam-se por suas características construtivas (ARAÚJO, 2016).

Como veículo autopropelido, é possível caracterizá-lo quanto a potência do motor, tipo de transmissão, tipo de suspensão, bitola, vão livre e tipo de barra.

Motor: O motor diesel é o componente responsável por gerar energia mecânica que, juntamente com a transmissão, proporcionam aos pulverizadores autopropelidos autonomia em suas operações. Além disso, é responsável pelo acionamento dos componentes do circuito hidráulico. A potência do motor está relacionada com as características da máquina, como o tipo de transmissão, a capacidade do tanque e tamanho da barra, que depende da demanda do agricultor (ARAÚJO, 2016).

Transmissão: Basicamente o sistema de transmissão é responsável de levar a energia gerada pelo motor até as rodas, podendo ser **mecânica ou hidrostática**. As transmissões **mecânicas** são formadas basicamente por embreagem, câmbio, diferencial e redutores. O tipo de tração pode ser nos rodados traseiros (4x2) ou nas quatro rodadas (4x4). Já as transmissões **hidrostáticas** são compostas por uma bomba hidráulica que aciona os motores hidráulicos localizados junto aos rodados. Esses pulverizadores têm tração nas quatro rodadas (4x4) (ARAÚJO, 2016).

Suspensão: Como veículo, o pulverizador autopropelido deve possuir um sistema de suspensão para amortecimentos de impactos, conforto ao operador e estabilidade nas irregularidades do terreno. Basicamente os tipos de suspensão nesses equipamentos são mecânicos, ou seja, feito por molas e amortecedores, ou pneumático/hidráulico (ARAÚJO, 2016).

Bitola e Vão Livre: Bitola é a medida de centro a centro dos pneus traseiros e dianteiros do pulverizador, sua principal função é adequar a entrada da máquina nas entrelinhas da cultura, pulverizadores autopropelidos podem ter bitola fixa ou variável. Já o Vão livre, pode ser entendido como a medida do solo até a parte inferior do chassi da máquina, do mesmo modo pode ser fixa ou variável, sendo que esta segunda configuração é mais adequada, pois permite aplicações em diferentes estágios das cultivares (ARAÚJO, 2016).

2.1.2 Sistema de barras

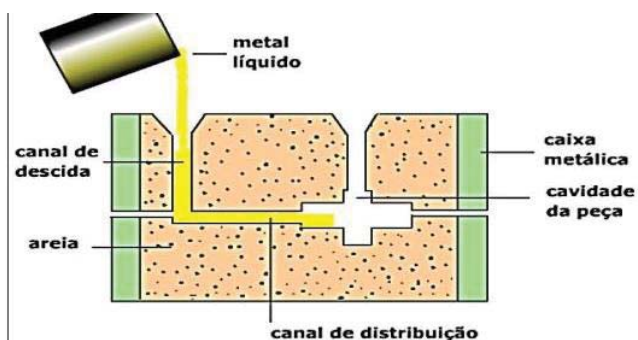
A barra do pulverizador é parte do sistema da máquina onde são fixados os bicos de pulverização, o seu tamanho e localização diversificam de acordo com cada marca e modelo do pulverizador. Praticamente todas as barras dos pulverizadores autopropelidos utilizam de um sistema de suspensão com molas e amortecedores, tendo em vista que evitar oscilações e manter um bom paralelismo entre a barra e o solo é muito importante para uma perfeita aplicação. Outro fator relevante na qualidade da aplicação é a velocidade de trabalho; em vista disso várias tecnologias estão sendo acrescentadas nas barras com o objetivo de reduzir as oscilações horizontais e verticais, permitindo, assim, maiores comprimentos e consequentemente mais rendimento operacional (ARAÚJO, 2016).

Quanto à localização da barra no chassi do pulverizador, ela pode estar posicionada na parte frontal da máquina, central ou traseira. A maioria dos pulverizadores autopropelidos traz a barra aplicada na parte traseira (ARAÚJO, 2016). Um grande benefício de a barra ser aplicada no centro da máquina é a perfeita distribuição de massa, que aliada a mecanismos de construção do projeto fazem com a barra permaneça o maior tempo possível paralela ao solo, e assim pulverizando por mais tempo em uma altura ideal e uniforme (STARA, 2021).

2.2 Processo de fundição

O processo de fundição tem por objetivo a fabricação de peças metálicas, entre os processos atuais de fabricação, o processo de fundição é uma ótima alternativa para a fabricação de componentes. Segundo Chiaverini, (2005) aços fundidos e ferros fundidos geralmente são vazados em moldes de areia ou metálicos, onde adquirem a forma exata da cavidade do molde, conforme esquema mostrado na Figura 4. Quando se trata de peças fundidas, os moldes conferem às mesmas, suas formas praticamente definitivas, necessitando eventualmente, de pequenos ajustes através de operações de usinagem para acabamento.

Figura 4 - Metal líquido sendo vazado no molde para fundição



Fonte: Centro de Informação Metal Mecânica, (2021)

Atualmente existem vários métodos para fabricação de peças fundidas, cada um com suas particularidades, dependendo do grau de qualidade exigido pela peça se adequa o melhor processo, analisando os custos envolvidos no processo, acabamento superficial, precisão dimensional e outros fatores pontuais que podem ter interferência. Segundo Rossitti, (1993) os processos mais comuns de fundição estão descritos abaixo, embora existam tantos outros.

- Fundição em areia sintética também chamada areia verde ou areia preta;
- Fundição em areia cura-frio;
- Fundição em areia Shell;

- Fundição em cerâmica;
- Fundição em cera perdida.

Basicamente esses processos se diferem pelo tipo de formação do molde, por exemplo na moldagem em areia, constrói-se um molde para cada peça a ser fundida, e posteriormente ele é rompido para que seja removido o fundido, ou seja, desmoldá-lo. Em outros casos como na fundição sob pressão, o molde é permanente, podendo ser utilizado repetidas vezes para uma sucessão de peças fundidas, garantindo muito mais agilidade quando comparado com o molde em areia. Em ambos os casos, no entanto, é necessária abastecer de metal líquido o molde para que preencha todas as partes do sistema e permaneça no local até que sua solidificação termine, sem gerar nenhuma falha ou defeito na peça acabada (AGOSTINHO, VILELLA e BUTTON, 2004).

O molde para produção de peças fundidas pode ser feito de várias maneiras. Pode ser confeccionado com madeira, metal, ou até mesmo feito através de impressoras 3D, processo atualmente muito utilizado. A maneira mais comum para projeto do molde é obtê-lo em duas partes, superior e inferior. Se o fundido tiver regiões ocas, são feitos modelos separados denominados “machos” que são instalados no interior da cavidade do molde. O espaço entre a cavidade e o macho será então preenchido pelo metal líquido, que se solidifica, formando peça fundida (AGOSTINHO, VILELLA e BUTTON, 2004).

Atualmente pode-se fundir peças com as mais variadas geometrias, ocas ou maciças, grandes ou pequenas, o processo de fundição evoluiu a tal ponto que não exista peça que não possa ser fundida, em contrapartida deve-se avaliar o projeto da peça às vantagens e limitações de cada processo de fundição (AGOSTINHO, VILELLA e BUTTON, 2004).

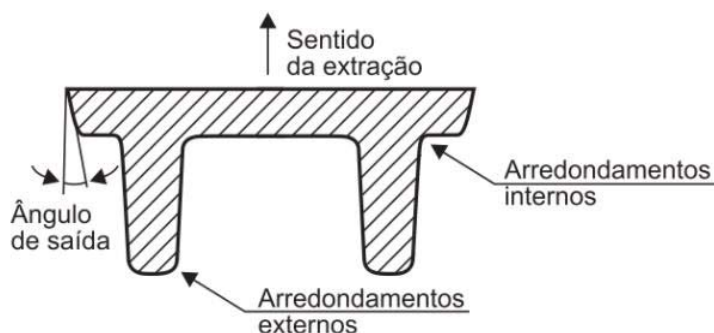
2.2.1 Projeto de peças fundidas

Ao iniciar o projeto de uma peça fundida, existem vários pontos a serem observados pelo projetista, alterações devem ser feitas no projeto da peça mecânica para adequar ao processo de fundição. Fenômenos que ocorrem durante a solidificação do metal líquido, tensões provenientes do resfriamento devem ser levadas em consideração, evitando problemas oriundos do processo (BALDAM e VIEIRA, 2014).

A resistência mecânica de uma peça fundida pode ser mais influenciada pela uniformidade das espessuras, do que pelos reforços em determinadas seções. Considerando isso as variações de espessura devem ser feitas de maneira gradual, de modo que ao vazar o metal líquido ele possa fluir de maneira natural preenchendo toda a peça (FERREIRA, 1999).

Segundo Baldam e Vieira (2014), um bom projeto de peça fundida, deve sempre contemplar os ângulos de saída e arredondamentos dos cantos da peça, isso tem grande importância para a extração do modelo no molde de fundição. A Figura 5 indica os ângulos de saída e também arredondamentos de cantos que devem estar contemplados no projeto de peça fundida.

Figura 5 - Representação dos ângulos de saída, e arredondamentos



Fonte: Adaptado Baldam e Vieira (2014)

O grau de inclinação a ser utilizado nas paredes da peça, depende do comprimento e da complexidade desta, algumas regras básicas para o dimensionamento dos ângulos de saída são necessárias, visto que adicionam material na peça (BALDAM e VIEIRA, 2014).

Pode-se citar como regras básicas para projetos:

- Todos os ângulos devem ser orientados pela superfície de apartação do molde;
- Paredes altas devem contemplar ângulos pequenos;
- Paredes internas devem contemplar ângulos maiores.

Na Tabela 1 é apresentado valores característicos para ângulos de saída em função da altura da parede da peça.

Tabela 1 - Ângulo de saída para paredes verticais de modelos em função da altura

Altura da parede (mm)	Ângulo de saída	Ângulo de saída (mm)
10 no máximo	3°	-
11 a 18	2°	-
19 a 30	1° 30'	-
31 a 50	1°	-
51 a 80	45'	-
81 a 180	30'	-
180 a 250	-	1,5
251 a 315	-	2,0
316 a 400	-	2,5
400 a 500	-	3,0
500 a 360	-	3,5
630 a 800	-	4,5
800 a 1.000	-	5,5
1.000 a 1.250	-	7,0
1.250 a 1.600	-	9,0
1.600 a 2.000	-	11,0
2.000 a a2.500	-	13,5
2.500 a 3.150	-	17,0
3.150 a 4.000	-	21,0

Fonte: Adaptado Baldam e Vieira (2014)

Quando comparadas as tolerâncias de produtos fundidos com usinados, percebe-se que existem muitas diferenças, especialmente na moldagem em areia, neste caso é difícil garantir tolerâncias dimensionais muito estreitas, cabe ao engenheiro avaliar se tal diferença pode ser absorvida, e caso não possa, outros processo de fabricação podem ser utilizados após o processo de fundição, garantindo a perfeita utilização e montagem da peça (BALDAM e VIEIRA, 2014).

A Norma ABNT NBR 6927 apresenta valores de afastamentos dimensionais de peças de ferro fundido nodular, também estabelece variações aceitáveis para dimensões de peças brutas. Esses afastamentos são designados pelas letras GT (graus de tolerância), seguido das letras FE (para ferro fundido nodular) e finalmente pelo grau de tolerância.

Na Tabela 2 pode-se observar indicações de afastamentos referentes a espessuras de parede e de nervuras da peça. As variáveis para definição do afastamento admissível são: grau de tolerância escolhido para aplicação no projeto e dimensão da espessura da parede ou nervura.

Tabela 2 - Afastamentos admissíveis para espessura de parede e nervuras

Grau de Tolerância	Dimensões (mm)					
	Até 10	Acima de 10 até 20	Acima de 20 até 30	Acima de 30 até 50	Acima de 50 até 80	Acima de 80 até
GTFE1	±2,0	±2,5	±3,0	±3,5	±5,5	±5,5
GTFE2	±1,5	±2,0	±2,5	±3,0	±4,5	±4,5
GTFE3	±1,1	±1,3	±1,6	±2,0	±3,5	±3,5
GTFE4	±1,0	±1,1	±1,2	±1,3	±1,4	-

Fonte: Adaptado de Norma ABNT NBR 6927(2015)

Ao final chega-se a algumas considerações a serem observadas para o projeto de uma peça fundida, visando atender desde o início uma boa qualidade no processo de fundição:

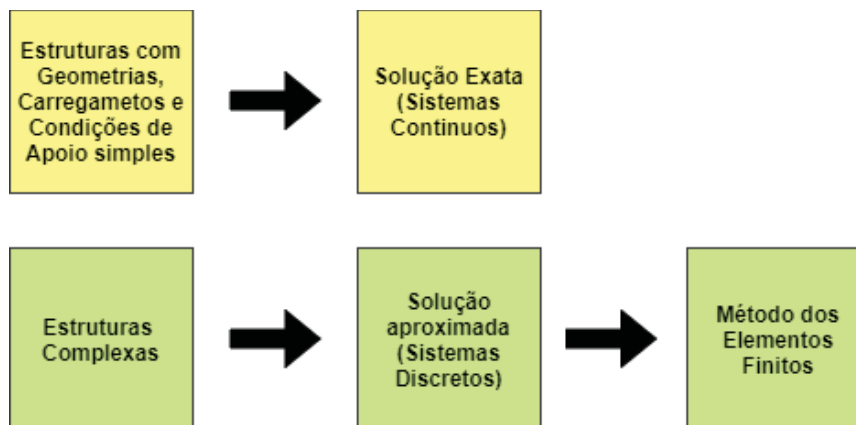
- Utilizar espessuras mais homogêneas quanto for possível;
- Utilizar concordâncias nas uniões das seções;
- Aplicar ângulos de extração na peça;
- Utilizar cantos arredondados;
- Evitar zonas maciças, que possam dificultar o arrefecimento.

Respeitando estas boas práticas de projeto, evita-se falhas ou defeitos de fabricação, fissuras, falhas e bolhas. O sucesso do processo de fundição depende diretamente do projeto do componente.

2.3 Método dos elementos Finitos (MEF)

Conforme Alves Filho (2013), no desempenho de suas funções, engenheiros se deparam com os mais variados tipos de problemas técnicos, simples ou complexos; para resolvê-los da melhor maneira possível, utilizam toda a base de conhecimentos adquirida durante o curso de engenharia. O Método dos Elementos Finitos (MEF) pode ser empregado em qualquer situação, gerando resultados satisfatórios. Em resumo, a escolha de utilização do MEF pode ser mostrada através da Figura 6.

Figura 6 - Representação dos caminhos para resolução de problemas de Engenharia



Fonte: Adaptado de Filho, 2013

Em particular, na área de cálculo estrutural o engenheiro necessita ter conhecimento em tudo que envolve a análise, da parte matemática (equações diferenciais), teórica (resistência dos materiais, teoria da elasticidade, etc) e também de fenômeno físico que compreendem o comportamento da estrutura. De maneira geral, problemas mais simples podem ser solucionados por métodos analíticos convencionais, já problemas mais complexos requerem métodos mais sofisticados.

É exatamente na resolução de problemas complexos que o MEF está inserido, com ele é possível gerar resultados aproximados de tensões, deformações das estruturas e deslocamentos, permitindo uma aplicação muito mais ampla e gerando resultados satisfatórios no âmbito da engenharia (ALVES FILHO, 2013)

O objetivo do método é determinar as tensões e deformações de qualquer estrutura, o MEF ainda permite que sejam feitas modificações na geometria durante o projeto, proporcionando várias soluções diferentes para o mesmo problema, e com isso permitindo soluções funcionais e econômicas.

2.3.1 Tipos de análise

A partir da necessidade de resolução de algum problema envolvendo análise estrutural, uma questão importante é a classificação quanto a geometria, modelo do material, e carregamentos aplicados (AZEVEDO, 2003). A seguir citam-se alguns aspectos importantes na fase que antecede a análise de alguns conjuntos ou estrutura.

Análise dinâmica ou estática: As ações atuantes em uma estrutura geralmente são dinâmicas, portanto, devem ser consideradas forças de inércia associadas a acelerações em cada componente; contudo, em muitas situações é coerente considerar que ações aplicadas de modo lento, podem ser desprezadas as forças de inércia, nestes casos a análise torna-se estática (AZEVEDO, 2003).

Análise não linear ou linear: Deve-se verificar na análise, se os deslocamentos gerados pelos carregamentos podem ser muito pequenos quando comparados ao tamanho de seus componentes. Se isso ocorrer, pode-se assumir que as tensões não serão afetadas pelas mudanças na geometria da estrutura caracterizando um tipo de análise linear. Já em casos em que as tensões são afetadas pelos deslocamentos da geometria deve ser tratado da análise não-linear (AZEVEDO, 2003).

2.3.2 Tipos de elementos

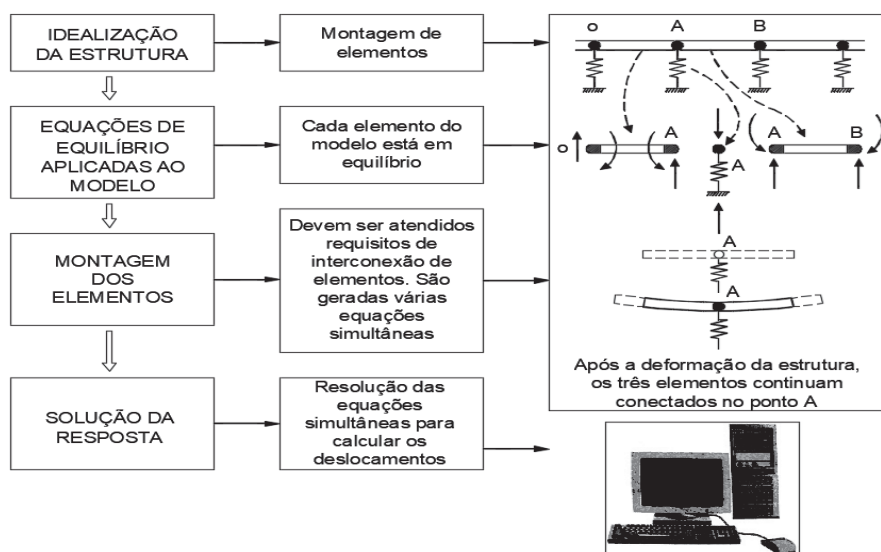
As estruturas podem ser classificadas quanto à sua geometria como viga, casca ou sólidas. Os elementos de vigas são caracterizados por possuir dimensão transversal muito menor que o seu comprimento. Quando a espessura de uma peça é muito inferior as outras dimensões e uma superfície média pode ser criada, podemos considerar como elemento de casca. E por fim quando uma geometria é tão complexa que não se pode considerar tais simplificações, o elemento é tratado como sólido.

2.3.3 Sistemas discretos

Na abordagem de uma estrutura e equilíbrio, a discretização de um sistema contínuo considera a divisão de uma estrutura em partes separadas distintas, conectadas entre si por **pontos discretos**, ou também conhecidos como **nós**, (O, A, B, C) conforme ilustrado na Figura 7. A solução por discretização considera o comprimento finito de um elemento, onde são calculados somente os deslocamentos nos nós (ALVES FILHO, 2013).

Segundo Alves Filho (2013), o modo como a estrutura se comporta entre os nós do modelo, vai depender das propriedades atribuídas ao elemento escolhido. A partir do conhecimento dos deslocamentos de cada nó, é possível calcular o comportamento interno de cada elemento. Quanto melhor for especificado o comportamento interno, mais se chegará próximo ao comportamento real da estrutura.

Figura 7 - Método Geral para Análise de Sistemas



Fonte: Adaptado de Alves Filho (2013)

Após a idealização da estrutura já é possível montar os elementos de forma concreta. Na idealização, são estabelecidas as propriedades e os tipos de elementos a ser utilizados para realização da análise.

As equações de equilíbrio representam os carregamentos e esforços presentes na estrutura e devem satisfazer a condição para que cada elemento permaneça em equilíbrio.

A montagem dos elementos é a etapa de interconexão dos elementos, transformando os deslocamentos locais em deslocamentos globais, através de equações.

Por fim, a etapa de solução é a resolução das equações e apresentação dos resultados obtidos para os deslocamentos da estrutura simulada.

2.3.4 Leis fundamentais para aplicação Método dos Elementos Finitos

A ideia de um modelo matemático que representa de forma discreta a estrutura pode ser feita a partir da aplicação das leis da mecânica estrutural. Apesar da aplicação dessas equações ser feita inicialmente em estruturas reticuladas, esses conceitos também podem ser aplicados nos elementos bi e tridimensional (ALVES FILHO, 2013).

A estrutura para estar em equilíbrio, precisa satisfazer as três “leis” ou relações fundamentais a seguir

- **Equilíbrio de forças:** Considerando o estado de equilíbrio da estrutura, aplica-se as equações de equilíbrio conhecidas do estudo da mecânica a cada um dos elementos isoladamente.
- **Compatibilidade de deslocamentos:** Embora a estrutura sofra deformações os elementos são conectados pelos nós, portanto em condições de deformação, eles permanecem conectados.
- **Lei de comportamento do material:** Em grande parte das aplicações práticas, quando o nível dos esforços não for muito elevado, as forças internas crescem proporcionalmente às deformações. Essa relação é conhecida como Lei de Hooke (ALVES FILHO, 2013).

Nas estruturas reais, existem muitos componentes de deslocamento e também componentes de rigidez. A relação geral linear entre todas as forças externas e todos os deslocamentos nodais é melhor expressa em notação matricial.

$$\{F\} = [K] \cdot \{U\} \quad (1)$$

Onde:

F representa a matriz coluna todas as cargas nodais;

K representa a matriz de rigidez da estrutura, coeficientes de rigidez da estrutura inteira, que relacionam todas as forças e deslocamentos nodais;

U representa a matriz coluna com todos os deslocamentos nodais.

2.4 Otimização Estrutural

De acordo com Morishita (2015), a otimização estrutural tem por objetivo melhorar o desempenho de estruturas sem que requisitos estruturais de projeto sejam comprometidos. Quanto melhor ajustadas algumas características como massa, custo, rigidez, etc. melhor estará o projeto.

Para a definição de um problema de otimização são necessários os seguintes elementos:

- **Conjunto de variáveis de projeto:** parâmetros que definem o sistema, como geometria, propriedades do material e dimensões; podem ser contínuas, ou seja que assumem qualquer valor dentro de um intervalo, ou discretas, que neste caso assumem somente valores permitidos isolados.
- **Função e objetivo:** São as funções das variáveis de projeto estabelecidas. Em um problema de otimização, procura-se minimizar ou maximizar estas funções.

- **Restrições:** São as exigências que o projeto deve satisfazer. Limitações de variáveis do projeto. Existem restrições laterais, de igualdade ou desigualdade.

2.5 Otimização topológica

A otimização topológica é uma área de estudo dentro da otimização estrutural, tem por objetivo auxiliar na produção de estruturas para que tenham a máxima rigidez e para que sejam capazes de suportar cargas externas sem ocorrer deslocamentos e deformações significativas, e assim satisfazendo algumas restrições como o volume máximo (VITORINO, 2019).

Conforme Morishita (2015), a Otimização Topológica tem o objetivo de determinar a melhor distribuição de material em um domínio pré-determinado, garantindo que as restrições mecânicas sejam minimizando ou maximizando em função do objetivo. Os elementos do domínio são discretizado e recebem valores de 0 ou 1, sendo 0 a ausência de material, e 1 o preenchimento total de material.

A otimização consiste em determinar em quais pontos da estrutura que vão possuir ou não material, com isso, as densidades são parametrizadas, de modo que sua distribuição em cada ponto do domínio varie entre 0 e 1, para ausência ou presença de material, respectivamente. Um exemplo desse princípio é o método SIMP (*Solid Isotropic Material with Penalization*).

Para a obtenção de resultados bem-sucedidos, Morishita (2015) cita dois pontos importante a serem definidos:

- As restrições não devem ser exigentes demais, pois existe a possibilidade de serem obtidos apenas resultados não factíveis.
- A malha deve ser refinada o suficiente, ou seja, o tamanho dos elementos finitos deve estar numa faixa que os resultados sejam satisfatórios.

Após é feita a definição do domínio fixo estendido, que é o espaço onde o algoritmo pode fazer modificações na geometria, o próximo passo é fazer a discretização em elementos finitos para que se possa aplicar as condições de contorno (MORISHITA, 2015).

Após a definição, uma equação define qual dos materiais será utilizado em cada ponto x do domínio, como apresentada Equação 2:

$$C_{(x)} = X_{(x)} C_0 \quad (2)$$

Onde C_0 representa a propriedade básica do material, podendo ser o módulo de elasticidade ou sua densidade. $X(x)$ é a função que define a presença de material, com valores entre 0 e 1.

Ainda existe a possibilidade de o problema discreto não possuir solução, portanto é necessário realizar uma relaxação para o problema contínuo, através do método das densidades. Onde é feita a substituição da função $X(x)$ por $\gamma(x)$, que faz a distribuição contínua da variável de projeto e pode assumir valores intermediários entre 0 e 1.

Na intenção de diminuir esses efeitos, é feita uma adaptação, fazendo com que os valores de densidade se aproximem de 0 ou 1, chamada penalização ρ , e definida pela Equação 3:

$$C_{(x)} = \gamma_{(x)} \rho C_0 \quad (3)$$

2.5.1 Modelo de densidades SIMP

A utilização de uma função contínua ρ para descrever a distribuição do material deve ser feita da melhor maneira possível. Ela permite a obtenção de uma solução do problema de otimização topológica, mas dificulta a interpretação física e o posterior projeto da peça, uma vez que não será possível utilizar materiais diferentes, ou com diferentes densidades, em cada ponto do domínio, para representar valores de ρ entre 0 e 1 (VITORINO, 2019)

A fim de evitar esse problema, é aplicado o modelo SIMP, no qual, ao invés de ρ utiliza-se a função ρ^p para controlar a distribuição de matéria, sendo $p > 1$ um parâmetro de penalização responsável por fazer a diminuição da ocorrência de densidades no intervalo (0,1).

Como a microestrutura é desconhecida no método SIMP, se faz a consideração de um material artificial, porém a sua rigidez é conhecida. O critério de restrição de tensão adotado pelo método SIMP é o critério de *Von-Mises*, fazendo assim a relação entre densidade e rigidez, onde as propriedades isotrópicas de rigidez são consideradas no modelo de tensão (SIMONETTI, 2009).

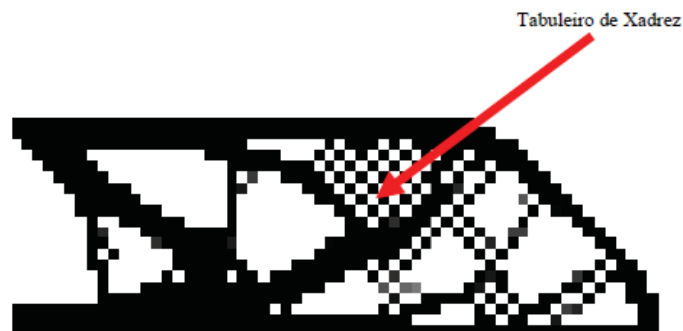
2.6 Problemas numéricos em Otimizações Topológicas

Com o passar do tempo e utilizando a Otimização Topológica percebeu-se alguns problemas no método, com isso, parte da comunidade científica dedicou-se ao estudo desses problemas. Entre eles estão o Tabuleiro de Xadrez, e a dependência da malha, descritos a seguir.

2.6.1 Tabuleiro de xadrez

O problema numérico de instabilidade de tabuleiro, também conhecido por tabuleiro de xadrez, de acordo com sua característica de forma, ocorre em uma formação de topologia ótima de regiões contendo vazios (sem material), e também sólidos (com material), que se dispõem de forma alternada, como pode ser identificado na Figura 8.

Figura 8 - Tabuleiro de xadrez presente na topologia



Fonte: Simonetti (2009)

Diante desse problema, Simonetti (2009) explica que a configuração de tabuleiro apresenta uma rigidez maior do que a homogênea, isso quando comparada em termos de deformação, cisalhamento e volume constante. Esta abordagem sugere como técnica para solução do problema, a utilização na formulação de elementos finitos, os elementos com funções de interpolação bi-lineares, por exemplo, elementos quadriláteros de quatro nós ou triangulares de três nós, a implementação com elementos de alta ordem (8 e 9 nós), pois estes

elementos poderiam simular de forma mais precisa o campo dos deslocamentos podendo, então, reduzir a ocorrência do problema de tabuleiro de xadrez.

Devido à dificuldade de implementação e o alto custo computacional destes tipos de elementos, surgem os filtros como alternativa de redução da instabilidade do tabuleiro de xadrez, que será comentado a seguir (SIMONETTI, 2009).

2.6.2 Dependência da malha

O problema da dependência da malha, o qual ocasiona diferentes soluções finais para diferentes discretizações manifesta-se justamente pelo fato de discretizar o domínio. Quando o domínio contínuo é discretizado, o espaço das soluções passa a ter dimensão finita. Assim, a cada nova discretização, uma nova solução mais refinada pode ser encontrada (SIMONETTI, 2009).

Em otimizações topológicas o esperado seria que quanto mais refinada a malha, melhores seriam os resultados, no entanto, pode-se observar que com o aumento da discretização, a topologia ótima tende a se alterar, aumentando o número de “buracos” e de membros da estrutura, conforme pode ser observado na Figura 9, onde o modelo (a) apresenta malha com 3840 elementos triangulares, enquanto o modelo (b) apresenta malha com 19200 elementos triangulares (SIMONETTI, 2009).

Figura 9 - Dependência da malha em problemas de otimização topológica



Fonte: Adaptado de Simonetti (2009)

2.7 Estrutura da construção voltada a produção

A estrutura de uma peça ou produto, ao contrário da estrutura de funções, indica a divisão em subconjuntos de produção e componentes. Essa estrutura, geralmente é definida pelo anteprojeto completo, e segue basicamente os seguintes parâmetros. (PAHL, BEITZ, *et al.*, 2011)

- O projetista decide o modo de produção e de aquisição dos componentes empregados, sejam componentes produzidos na própria fábrica ou por fornecedores, de componentes do estoque, padronizados ou repetitivos ou de componentes usuais encontrados no comércio.
- Estabelece o andamento da produção pela decomposição em subconjuntos, por exemplos, avalia se a produção simultânea de componentes individuais é possível.
- Fixa a ordem de grandeza das dimensões e o tamanho dos lotes dos componentes (peças iguais), bem como os locais necessários para junções e montagens; ou deve optar por subconjuntos.

As realidades da produção existentes na fábrica, como operadores de máquinas, recursos de montagem e transporte, etc. influenciam diretamente na decisão do projetista com

respeito à estrutura a ser selecionada. A decomposição de uma estrutura apropriada para a produção, pode ser efetuada segundo o sistema construtivo diferencial, integral, ou modular, conforme será visto a seguir, (PAHL, BEITZ, *et al.*, 2011).

2.7.1 Construção integral

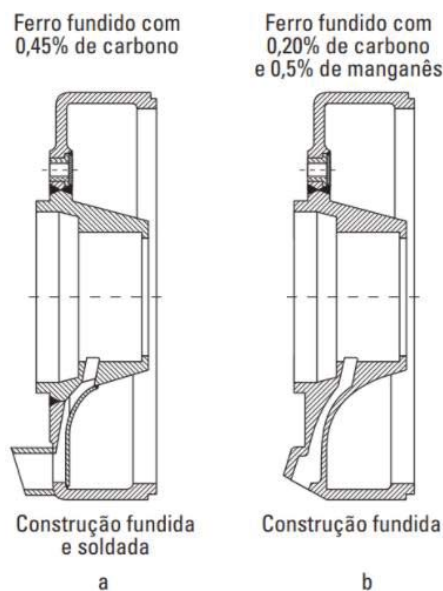
A construção integral pode ser entendida como a unificação de várias peças avulsas em um só componente. Exemplos típicos desse tipo de construção são as peças fundidas ou forjadas, ao invés de construções soldadas; perfis extrudados, ao invés de combinações de perfis normalizados, flanges forjados, ao invés de flanges parafusadas e semelhantes (PAHL, BEITZ, *et al.*, 2011).

A otimização de algum produto geralmente objetiva esse tipo de construção para uma transferência vantajosa em termos de custo, resistência mecânica e diversas outras vantagens em uma única peça.

De fato, em condições apropriadas de solicitação, produção e aquisição o modelo de construção integral pode ter várias vantagens, isso acontece geralmente em uma produção, onde o custo da mão-de-obra é elevado (PAHL, BEITZ, *et al.*, 2011).

Um exemplo desse tipo de construção pode ser visto na Figura 10 onde um alojamento para mancais construído por uma combinação de peças fundidas e forjadas (construção mista), é convertido em uma construção completamente fundida, apesar de ser uma peça relativamente grande, se consegue muitas vezes reduções de custos consideráveis avaliando todo o processo de produção.

Figura 10 - Modelo de construção integral de um mancal de rotor



Fonte: Adaptado de Pahl, Beitz, *et al.* (2011)

2.8 Considerações sobre revisão bibliográfica

Finalizado esse capítulo, pode-se concluir que o trabalho de pesquisa é de extrema importância para a resolução de problemas de engenharia. No decorrer desse capítulo foram introduzidos diversos assuntos de grande relevância para o projeto, inicialmente temos uma introdução sobre os pulverizadores agrícolas, seus tipos e suas particularidades.

É importante entender que entre os atuais processos de fabricação de peças metálicas, a fundição cada vez mais ganha espaço, possui características bem distintas de outros processos, confere a forma exata do molde a peça; sendo assim é uma ótima alternativa para a construção de componentes com geometrias complexas.

O entendimento de que para a solução de problemas técnicos, simples ou complexos; é dever do engenheiro de cálculo estrutural ter conhecimento amplo na parte teórica, física, prática, e também da parte matemática que envolve o assunto. Para auxiliar na solução de problemas complexos vimos que o Método dos Elementos Finitos é largamente utilizado, pois gera resultados aproximados de tensões, deformações e deslocamentos de estruturas, proporcionando soluções diferentes para o mesmo problema.

Na sequência foi apresentado o conceito de otimização estrutural, que por objetivo melhorar o desempenho de estruturas, sem que requisitos estruturais de projeto sejam comprometidos, dentro da otimização estrutural está inserida a otimização topológica, que auxilia no projeto de componentes para que se tenha a máxima rigidez.

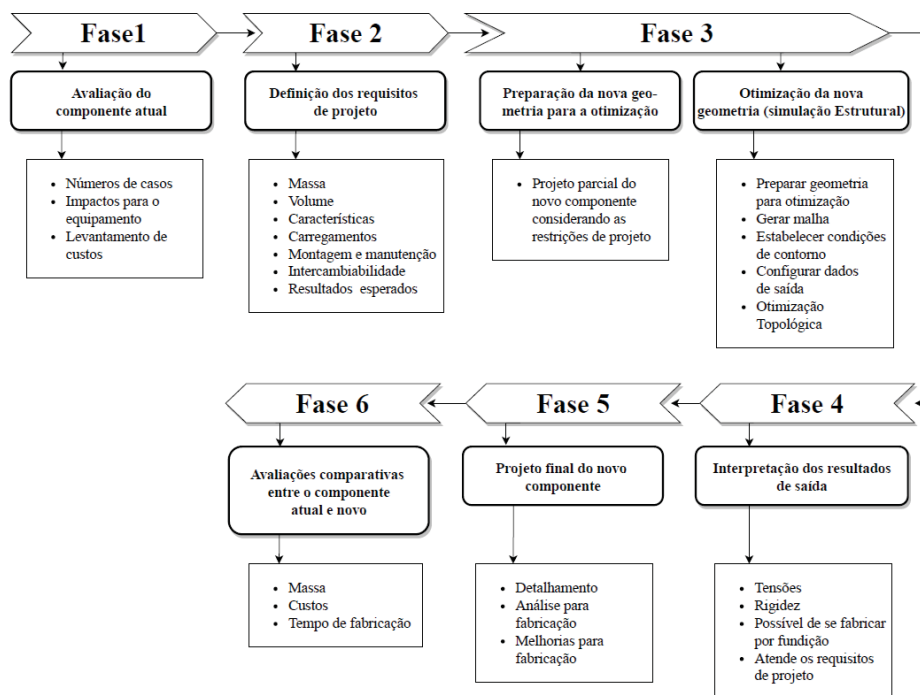
Por fim, foi descrito a estrutura de construção de componentes voltada a produção, onde verificou-se que a construção integral é a unificação de várias peças avulsas, geralmente esse tipo de construção objetiva maiores resistências mecânicas, ganhos em termos de custos diversas outras vantagens.

3 PROJETO DO NOVO COMPONENTE

Para o desenvolvimento do projeto do novo componente fundido, serão utilizadas seis etapas. Com a utilização dessas etapas procura-se detalhar o máximo possível o projeto para o correto desenvolvimento e aprovação do componente.

A Figura 11 mostra as etapas do desenvolvimento, apresentada nos capítulos 3, 4 e 5.

Figura 11 - Fases do desenvolvimento do projeto



Fonte: Autor, 2021

Na primeira fase será feito uma avaliação do componente atual, o qual apresenta falha em campo, será feito um levantamento de dados quanto aos números de casos da falha, os impactos que esta falha causa na máquina bem como os custos envolvidos na reparação.

A segunda fase é de extrema importância, pois nela é detalhada as definições e requisitos de projeto, as principais características do componente são especificadas nesta fase, como massa, limitações geométricas e espaciais, os carregamentos que o componente está exposto, critérios para a montagem e manutenções do componente.

A terceira fase é subdividida em duas etapas, onde a primeira é a preparação da geometria para a otimização. Nesta etapa será feito o projeto parcial do componente, considerando os requisitos de projetos que foram, estabelecidos na fase anterior. Para o projeto parcial será utilizado *software* de modelamento 3D.

Após o projeto parcial do componente, a etapa seguinte é a de Otimização da Geometria. Nesta etapa será feito a preparação da geometria proposta anteriormente, será gerada a malha de elementos, também será estabelecido as condições de contorno, dados de saída e pôr fim a otimização topológica da estrutura, que será feita através de *software* específico para essa aplicação.

Após a otimização do componente, a fase seguinte é a de interpretação dos resultados obtidos na otimização, tensões deslocamentos, rigidez. Também será avaliado se a geometria otimizada é possível de fabricar por processo de fundição.

Por fim é feito o projeto final do novo componente, o detalhamento para fabricação, análises e melhorias de processos serão feitas nesta etapa.

A última fase do projeto, traz avaliações comparativas entre componente atual, o qual apresenta falhas, e o novo componente otimizado. Avaliações comparativas de massa, rigidez, custos, tempo de fabricação serão detalhados nesta etapa.

3.1 Fase 1: Avaliação do componente atual

O componente que é utilizado atualmente é denominado **Articulador Principal**, é instalado nas barras do pulverizador autopropelido, conforme visto na seção 2.1.2; uma característica relevante da máquina, é de possuir barra central e com isso, o perfeito funcionamento das barras é indispensável para o desempenho da máquina.

Como já conhecido, a grande maioria dos pulverizadores autopropelidos possui barra esquerda e direita, e no caso de estudo não é diferente; a máquina possui um **articulador principal direito** e outro **articulador principal esquerdo**. Porém, como as forças e carregamentos atuantes são os mesmos tanto no lado direito quanto esquerdo, será feito o projeto para um lado da máquina e ao final será feito o detalhamento de dois componentes fundidos, para ambas as barras do pulverizador.

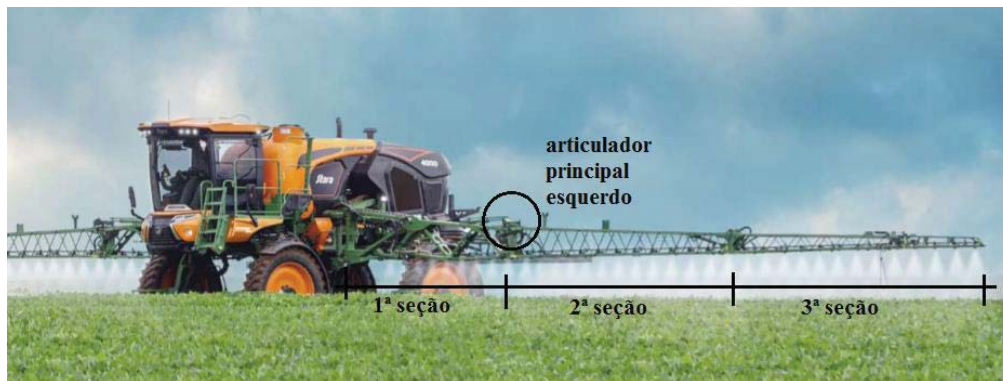
A máquina onde o componente atual está instalado é um pulverizador Stara modelo IMPERADOR 4000, que possui as seguintes características principais:

- Reservatórios de calda com capacidade máxima de 4.000 litros;
- Barras com comprimento de 30 ou 36 metros;
- Comprimento de 8,7 metros;
- Altura 4,4 metros;
- Distância entre eixos de 4 metros.

A função do componente é transferir o movimento do cilindro de abertura de barra, além disso, é responsável por manter a barra aberta com a máquina em trabalho.

A Figura 12 e Figura 13 ilustram a posição onde o componente é instalado na barra do pulverizador.

Figura 12 - Local de montagem do articulador principal esquerdo



Fonte: Adaptado de Stara (2021)

Figura 13 - Imagem em vista isométrica do articulador principal esquerdo



Fonte: Autor, 2021

Ocorre que em algumas máquinas o componente articulador principal apresentou falha, conforme visto na Figura 14. Se o componente apresentar falha similar em trabalho, a máquina fica impossibilitada de continuar a operação e não será possível fazer o fechamento das barras do equipamento.

Figura 14 – Falha do componente



Fonte: Autor, 2021

Em algumas máquinas, o articulador apresentou trincas no conjunto, que se propagadas evoluem para a falha completa do componente, conforme visto na Figura 15.

Figura 15 - Trincas no articulador principal

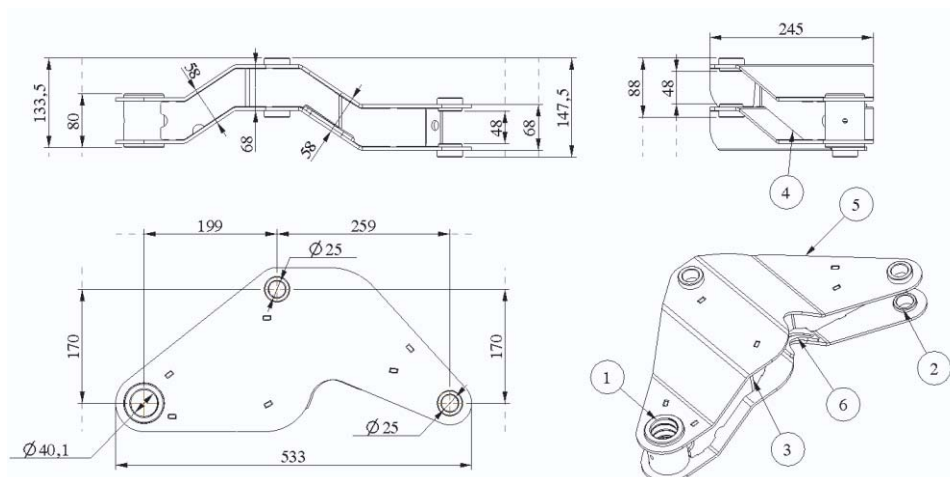


Fonte: Autor, 2021

Os processos de fabricação necessários para a fabricação do componente atual são: corte a laser, dobra, usinagem, soldagem e pintura.

Ao final dos processos descritos, é obtido o conjunto articulador soldado conforme detalhamento ilustrado pela Figura 16.

Figura 16 - Detalhamento conjunto articulador atual



Fonte: Autor, 2021

O componente atual é composto basicamente por chapas metálicas de material LNE 380 e buchas de aço SAE 1020 e VMEC134AP, conforme mostra a Tabela 3 - Itens utilizados no conjunto articulador

Tabela 3 - Itens utilizados no conjunto articulador

ITEM	CÓDIGO	DENOMINAÇÃO	QUANTIDADE
1	1784	BUCHA CILIND VMEC 134AP 40x60x80	1
2	1801	BUCHA CILIND 1020 25x35x20	4
3	1371	ESTRUTURA CENTRAL 01	1
4	1374	ESTRUTURA CENTRAL 02	1
5	1972	CHAPA ARTICULADOR PRINCIPAL	2
6	1585	REFORÇO ESTRUTURA ARTICULADOR	1

Fonte: Autor, 2021

Para facilitar o processo de fabricação, é confeccionado um dispositivo para soldagem do componente, responsável por garantir o correto posicionamento das peças, agilizando o processo de fabricação e garantindo as medidas especificadas em projeto.

3.1.1 Números de casos da falha

Consultando o setor de Pós-vendas, foi possível fazer um levantamento do número de casos de falhas em um período aproximado de 6 meses, conforme visto na Tabela 4.

Tabela 4: Casos da falha no componente articulador principal

Máquina	Data da ocorrência	Número de defeitos	Horas da máquina
1	30/03/2020	1	893
2	09/05/2020	1	1141
3	25/07/2020	1	513
4	16/09/2020	1	114
5	03/10/2020	1	160

Fonte: Autor, 2021

No período de análise, um total de 5 máquinas apresentaram falha a campo, sendo que a média de horas da máquina é de 564,2 h, e com desvio padrão de 402,4. Porém, pode-se notar que duas máquinas apresentaram falha prematura do componente, chegando a falhar com menos de 200 horas.

O número de defeitos não faz distinção se a falha ocorreu no articulador esquerdo ou direito, apenas informa que ocorreu falha na máquina.

3.1.2 Impactos para o equipamento

Como principal impacto para a máquina, pode-se citar a inviabilidade de operação, como o componente articulador é responsável por transferir a ação do cilindro de abertura de barras, situado na primeira seção da barra, (ver Figura 12), se o componente apresentar a falha, não é possível abrir ou fechar a barra da máquina.

Quando a máquina está em operação, eventualmente o rodado passa por obstáculos que transferem esforços horizontais na barra, aceleração ou desaceleração na máquina também transferem a barra esforços horizontais; com isso, se o componente apresentar falha catastrófica em operação, mais componentes da barra podem ser danificados, como por exemplos os conjuntos soldados da segunda e terceira seção da barra, bicos de pulverização e sensores que são instalados também podem sofrer avarias, tornando o tempo de reparação maior do que o esperado.

3.1.3 Definições sobre o projeto

Após o problema exposto, decidiu-se por fazer uma mudança de projeto no articulador principal da barra, onde será empregada a chamada construção integral, o método de fabricação da peça atual, que é confeccionada por processo de soldagem, passará a ser produzido pelo processo de fundição, onde o material a ser utilizado é ferro fundido. Optou-se por esse método devido a facilidade de fabricação de peças com geometrias complexas, podendo assim otimizar as regiões que não estão sendo solicitadas, e proporcionar uma boa distribuição de material onde realmente é necessário, e assim resistir aos esforços solicitados na barra pulverizadora.

3.2 Fase 2: Definição dos requisitos de projeto

A seguir serão apresentados os requisitos condições ou capacidades que devem ser seguidas no decorrer do projeto do articulador principal, esses requisitos são de extrema importância para satisfazer o funcionamento do equipamento.

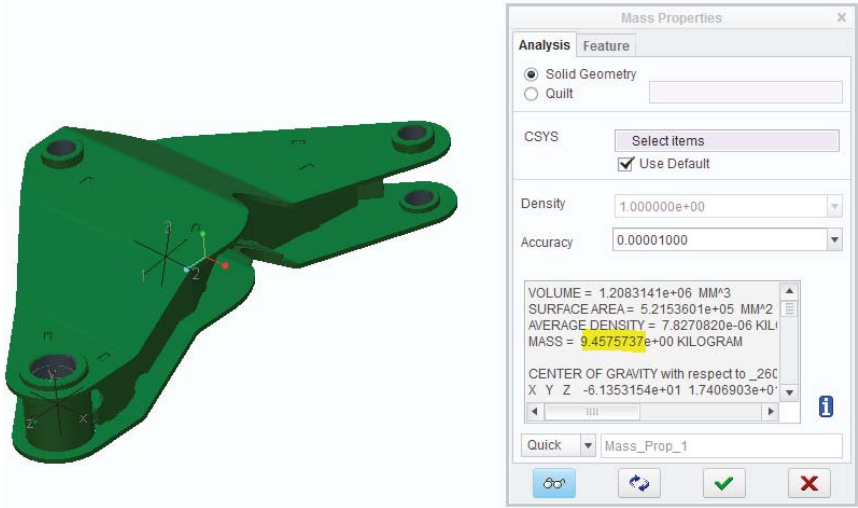
3.2.1 Características importantes

Algumas características do projeto atual devem ser mantidas, devido a necessidade de substituir esse componente em máquinas que apresentarem falha a campo. Com isso, os pinos e elementos de fixação que são utilizados na montagem do conjunto não podem sofrer modificações em seu diâmetro. O ideal é não modificar o comprimento, mantendo assim os mesmos elementos de fixação, mas caso seja necessário modificar o comprimento dos pinos, pode ser feito.

Devido a posição de instalação na barra da máquina, há limitações geométricas e de espaço que devem ser consideradas, basicamente o novo conjunto não deve ser maior que o atual conjunto soldado.

A massa do novo componente é um parâmetro que tem limitações. Após a otimização, poderá admitir-se um pequeno aumento de peso, tendo em vista o aumento da resistência estrutural buscando a resolução do problema de falha. O peso atual do articulador utilizado atualmente é de 9,45 kg, conforme pode ser visto na Figura 17. Desse modo, dependendo do resultado da otimização, essa massa poderá variar um pouco para mais ou para menos.

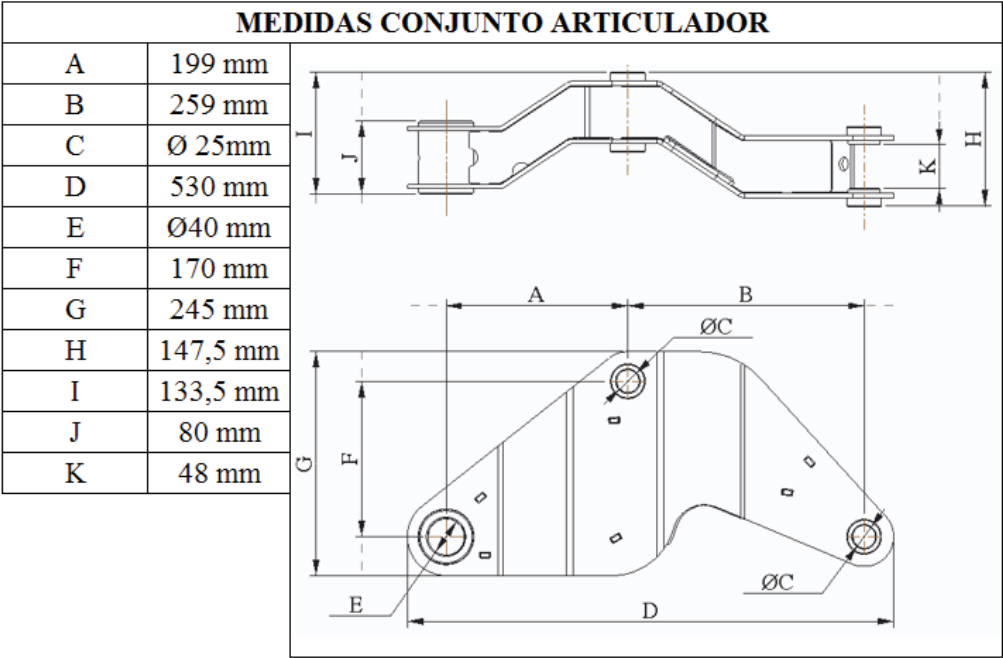
Figura 17 - Massa do atual conjunto soldado



Fonte: Autor, 2021

As principais medidas a serem consideradas para o projeto do novo articulador estão expressas na Figura 18.

Figura 18 - Medidas para novo articulador



Fonte: Autor, 2021

3.2.2 Montagem e manutenção

É importante que o novo articulador seja de fácil montagem; com isso, é desejado que não seja considerado no projeto mecanismos que dificultem a montagem, o acesso para montagem dos pinos deve ser fácil e as tolerâncias dos furos devem permitir que seja instalado na máquina apenas com auxílio de chaves de mão; montagens com interferência devem ser desconsideradas dessa utilização.

3.2.3 Intercambiabilidade

Devido necessidade de instalação em campo, para manter a intercambiabilidade entre os dois componentes, os diâmetros dos furos e as principais medidas do componente devem ser mantidas, ou seja, as medidas vistas na Figura 18, A, B, C, E, F devem ser as mesmas do articulador soldado.

3.2.4 Carregamentos

Para a definição do carregamento ao qual o articulador estará sendo submetido, será considerado o cilindro de abertura da barra, que possui as seguintes características.

- Diâmetro da camisa $D = 63,5 \text{ mm}$
- Diâmetro da haste $d = 31,75 \text{ mm}$
- Curso $C = 450 \text{ mm}$
- Pressão de trabalho $P = 180 \text{ Bar}$

A força a qual o componente estará sendo submetido pode ser encontrada através da Equação 4.

$$P = \frac{F}{A} \quad (4)$$

Onde P é a pressão de trabalho, F é força que atua no componente e A é área da camisa do cilindro.

A pressão de trabalho fornecida é de 180 Bar, e a área da camisa do cilindro é encontrada através da equação 5:

$$A = \pi \cdot \frac{D^2}{4} \quad (5)$$

Onde A é a área da camisa do cilindro, D é o diâmetro da camisa do cilindro.

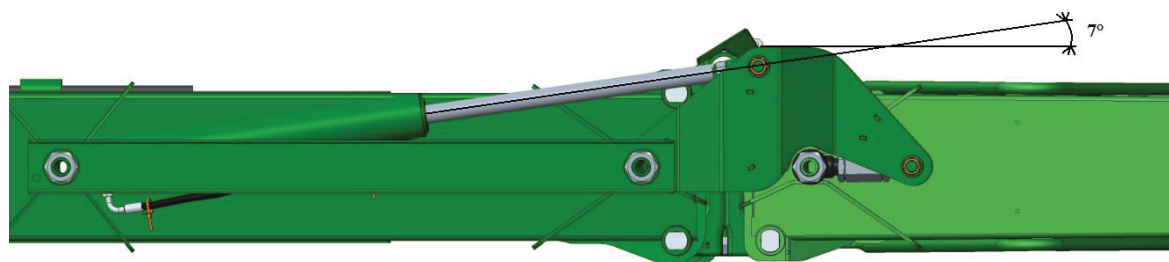
Fazendo os ajustes necessários na equação 4 obtém-se a Equação 6.

$$F = P \cdot A \quad (6)$$

Com as equações descritas acima pode ser encontrado a força que atuará no componente, que para essa situação é de 57.000 N.

A posição que essa força é aplicada no articulador pode ser vista na Figura 19.

Figura 19 - Ângulo de atuação da força no articulador



Fonte: Autor, 2021

Os resultados esperados para o projeto do novo articulador, é que se obtenha um componente fabricável por processo de fundição, que seja capaz de resistir os esforços aplicados na barra do pulverizador e que a massa do novo articulador não tenha grandes alterações, podendo variar um pouco para mais ou para menos.

3.2.5 Principais requisitos de projeto

Exposto no Quadro 1; está a lista de requisitos montada através das informações obtidas no decorrer desta seção e também na revisão bibliográfica. Inserido na lateral esquerda do quadro, estão as principais características a serem consideradas no projeto do novo articulador, ao centro do quadro estão os pontos de maior relevância para o projeto. Os requisitos foram classificados da seguinte forma: **E** - Exigência, esse requisito deve ser obrigatoriamente cumprido; **D** - Desejável, não é obrigatório, porém, deseja-se que seja cumprido.

Quadro 1 - Lista de requisitos para o novo articulador fundido

Lista de Requisitos de projeto para o articulador Fundido		E / D
1 - Geometria	Novo articulador com geometria próxima ao conjunto soldado	D
	Não deve possuir mudanças bruscas de espessura	D
	Não deve possuir regiões com muita massa	D
2 - Carregamentos	Suportar carregamentos de 57.000 N	E
3 - Massa	Articulador não deve ter massa superior a 12 kg	D
4 - Processo de Fabricação	Fabricável por processo de fundição	E
	Prever ângulos de extração na peça	D
5 - Montagem	Deve ser de fácil montagem e sem interferências	E
	Montagem apenas com chaves de mão	D
	Intercambiável com o articulador soldado	E
6 - Manutenção	Fácil acesso a pontos de lubrificação	D
7 - Custos	Não deve ter custo unitário maior que o articulador soldado	E
8 - Material	Utilização de ferro fundido	E
9 - Projeto	Entrega do projeto em dezembro de 2021	D

Fonte: Autor, 2021

3.3 Fase 3: Preparação da nova geometria

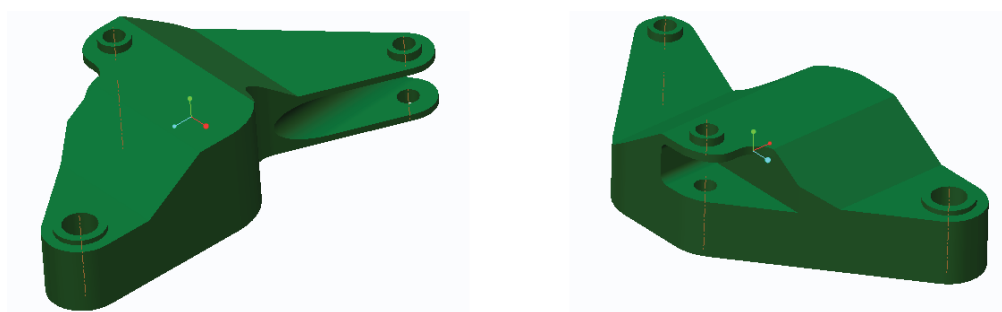
Na preparação da nova geometria a ser otimizada foi utilizado um *software* de modelamento 3D; com base nos requisitos do Quadro 1 e as especificações feitas no item 3.2.5 foi feito o projeto parcial do articulador da barra.

3.3.1 Projeto parcial do novo articulador

Com base nas especificações feitas no item 3.2.5, foi utilizado para o projeto as mesmas medidas das furações de montagens dos pinos e as dimensões principais do componente, com isso chegou-se ao projeto parcial do articulador, conforme mostra a Figura 20.

Basicamente, esse projeto parcial é um bloco único que contém a forma externa do articulador, porém, contém muito mais material que o necessário. Esse bloco será inserido no *software* para que seja feita a otimização topológica.

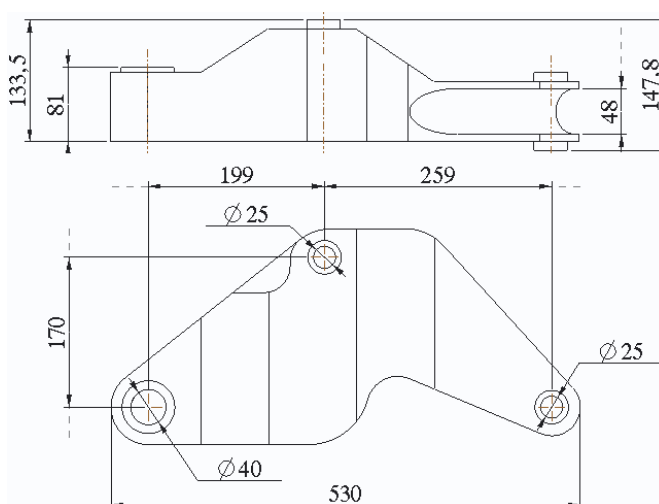
Figura 20 - Projeto parcial do novo articulador



Fonte: Autor, 2021

Considerando as medidas fixas vistas na Figura 21 A, B, C, E, F, obteve-se o projeto do novo articulador, para ser utilizado na otimização topológica, conforme mostra a Figura 21.

Figura 21 - Principais medidas do novo articulador



Fonte: Autor, 2021

3.4 Preparação para a otimização da nova geometria

Para a otimização do novo componente será utilizado um *software* específico para esta finalidade, no caso de estudo foi utilizado o *Ansys Workbench*. O Método de Otimização

Topológica é uma ferramenta computacional que está inserida no pacote do *Software Ansys Workbench*, e utiliza como base o modelo de densidades SIMP, conforme visto no item 2.5.1. Essa ferramenta é capaz de sintetizar estruturas mecânicas através da distribuição material em uma determinada região do espaço, respeitando as restrições impostas; para isso, faz uso de uma combinação entre o Método dos elementos finitos (MEF) e das ferramentas de otimização.

A grande vantagem do método de otimização topológica frente a outros métodos de otimização, é a capacidade de fornecer uma ótima distribuição material para uma dada aplicação, respeitando as restrições impostas, mas não ficando restrito a somente alterações em parâmetros da estrutura, como espessura, material ou comprimento.

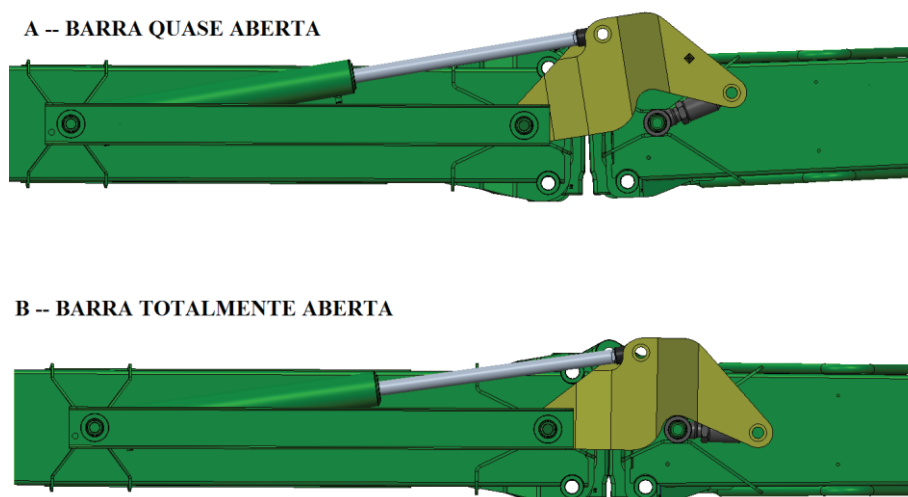
A seguir será detalhado os passos que foram seguidos para a otimização topológica da estrutura do articulador.

3.4.1 Condições analisadas

Devido a posição que o componente é utilizado na barra do pulverizador, duas condições serão analisadas; essas condições servem como dados de entrada para a otimização.

Para o projeto, duas condições serão analisadas; a primeira foi chamada de “**barra quase aberta**” ela ocorre quando o cilindro hidráulico está transmitindo o movimento para o articulador, instantes antes da barra ser travada na posição aberta ocorre o maior esforço no articulador, por isso essa condição precisa ser levada em consideração. A segunda condição que precisa ser analisada foi denominada de “**barra totalmente aberta**”, ela ocorre quando a barra está na posição de trabalho, porém a força máxima do cilindro está sendo transmitida para o articulador. Para ambas as condições a força máxima a ser aplicada foi descrita no item 3.2.4, uma força de 57.000 N. A Figura 22 mostra as duas condições que serão abordadas no estudo.

Figura 22- Condições analisadas no estudo



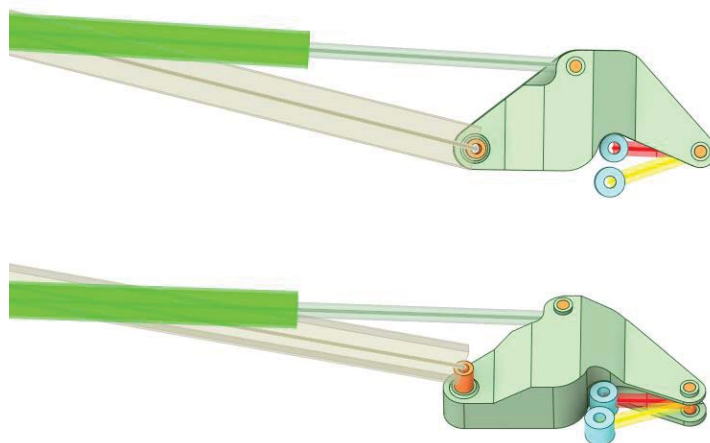
Fonte: Autor, 2021

3.4.2 Preparação da geometria

Para a otimização da nova geometria, os arquivos que são utilizados no *software* precisam ser salvos em formato “STEP”, esse formato de arquivo contém dados CAD 3D, com isso foi salvo os arquivos do articulador principal e também dos demais componentes que serão necessários para o estudo.

Devido à complexidade de todo o projeto das barras do equipamento, simplificações tiveram que ser feitas com o objetivo de diminuir o esforço computacional para as simulações e otimizações, foi retirado da análise os conjuntos das barras e trabalhado apenas com o articulador; após os arquivos salvos, foi devidamente realizada a montagem para dar sequência no estudo, conforme visto na Figura 23.

Figura 23- Montagem dos componentes



Fonte: Autor, 2021

3.4.3 Definição do material

O material que foi utilizado no estudo é o FE50007 - Ferro Fundido Nodular, este material apresenta um limite mínimo de escoamento de 350 Mpa e alongamento mínimo de 7%, de acordo com a NBR6916; a Tabela 5 mostra as características desse material. A escolha do FE50007 é em função da experiência que a fundição da empresa possui sobre essa liga metálica. Atualmente grande maioria das peças fabricadas pela fundição da empresa tem essa liga como matéria prima.

Tabela 5- Características ferro fundido nodular ou ferro fundido com grafita esferoidal

Classe	Limite mínimo de resistência à tração MPa	Limite mínimo de escoamento (0,2 %) - LE MPa	Alongamento mínimo em 5d - A %	Somente como informação	
				Faixa aproximada da dureza Brinell	Estrutura metalográfica predominante
FE 38017	380	240	17,0	140 - 180	Ferrítica
FE 42012	420	280	12,0	150 - 200	Ferrítica
FE 50007	500	350	7,0	170 - 240	Ferrítica e perlítica
FE 60003	600	400	3,0	210 - 280	Perlítica
FE 70002	700	450	2,0	230 - 300	Perlítica
FE 80002	800	550	2,0	240 - 312	Perlítica
FE 38017-RI ^a	380	240	17,0	140 - 180	Ferrítica

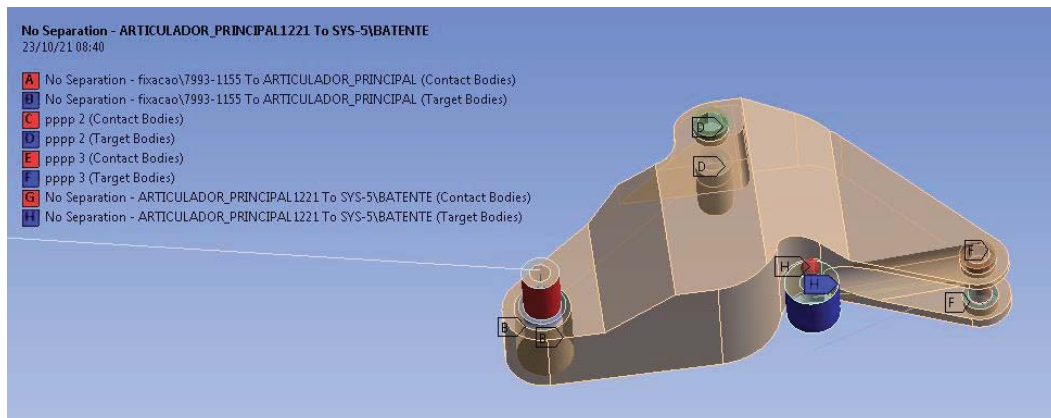
Fonte: Norma ABNT NBR 6916 (2015)

3.4.4 Condições de contorno

Após a seleção do material, foram definidos os pontos de contatos entre os pinos utilizados no estudo e o articulador; conforme mostra a Figura 24. Basicamente, nesta etapa

foram criados todos os pontos de contato que serão usados na análise da geometria parcial do articulador.

Figura 24- Definição dos contatos

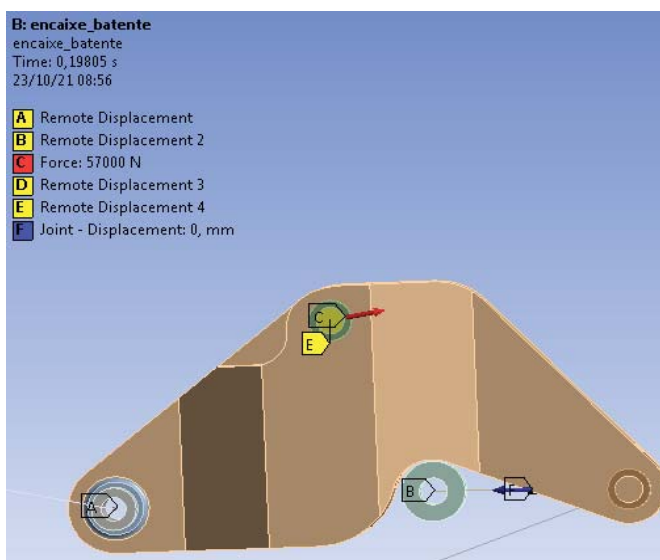


Fonte: Autor, 2021

Para a definição das restrições do conjunto, buscou-se representar no modelo numérico o comportamento que a seria aplicado na prática, ou seja, na condição de trabalho do articulador, com isso, os pontos de “A, B, C, D e E” mostrados nas Figura 1Figura 25 e 26 foram fixados, restringindo assim os seus movimentos de translação em todas as direções; já para o ponto “A” foi restringido a translação em todas as direções x, y e z; e as rotações restringidas em x e y, deixando livre a rotação em y.

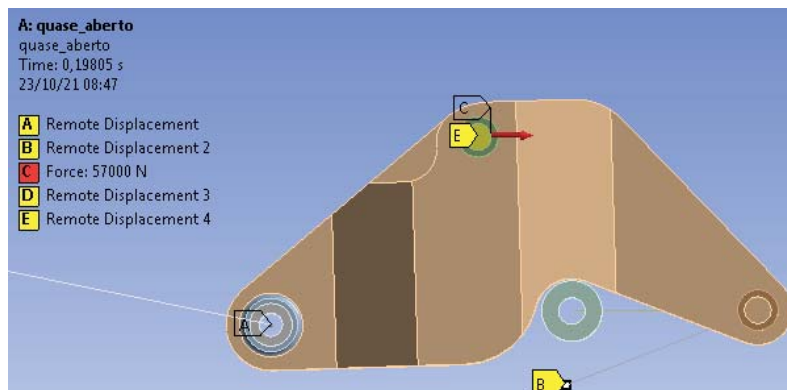
Por fim, no ponto “C” foi adicionado a força máxima que o cilindro hidráulico irá exercer sobre o articulador, conforme visto na seção 3.2.4, é uma força de 57.000 N. As Figuras 25 e 26 mostram as duas situações analisadas; “**barra totalmente aberta**”, onde a mesma se encontra apoiada no batente; e a segunda situação é a “**barra quase aberta**”, conforme visto nas figuras, em ambas as situações analisadas o ponto de atuação da forma é no pino “C”, variando apenas o ângulo em relação ao sistema de coordenadas.

Figura 25- Limites de deslocamento e atuação da força barra quase aberta



Fonte: Autor, 2021

Figura 26- Limites de deslocamento e atuação da força barra totalmente aberta

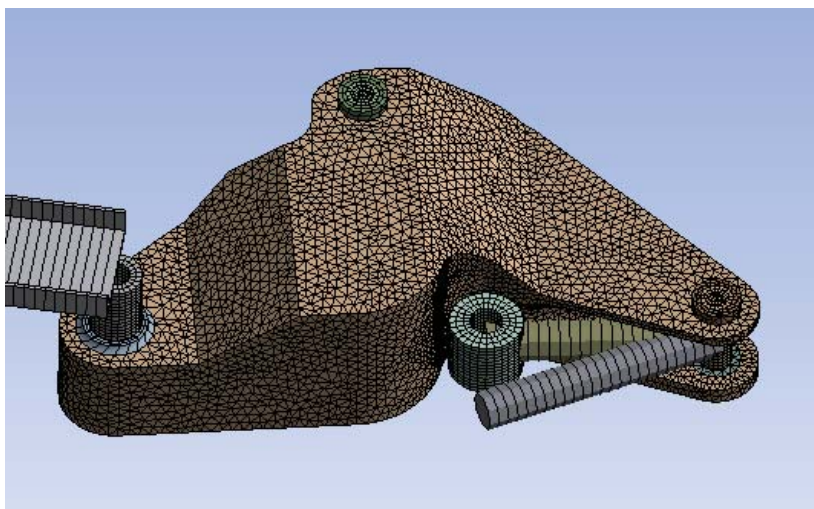


Fonte: Autor, 2021

3.4.5 Malha de elementos finitos

Após a definição dos contatos e aplicação do carregamento foi gerado a malha do conjunto. A malha foi gerada utilizando um elemento de ordem linear com tamanho de 8mm, o que gerou no articulador principal um total de 127.000 elementos e 184.741 nós. A definição do elemento com tamanho 8 mm se dá em razão de ser uma análise preliminar, com isso, a malha não necessita ser tão refinada. A Figura 27 mostra a malha gerada no articulador principal.

Figura 27- Malha gerada

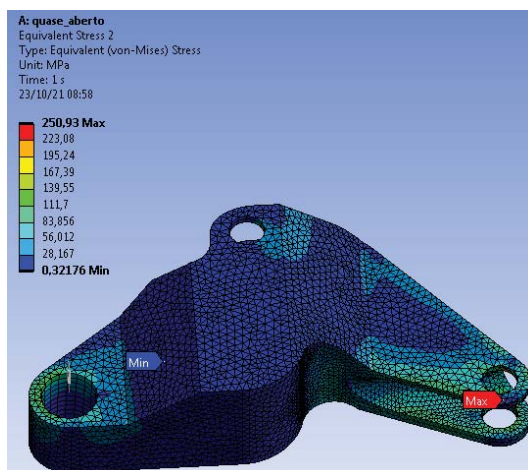


Fonte: Autor, 2021

3.4.6 Resultado parcial análise estática

Como dado de entrada para a otimização, foi realizado uma análise estática do projeto parcial do novo articulador, tendo como resultado de tensão máxima 250,93 MPa, conforme mostrado na Figura 28. Os resultados de deslocamento não são relevantes para esta etapa pois a geometria dessa análise não é a final.

Figura 28- Resultado da tensão no projeto parcial



Fonte: Autor, 2021

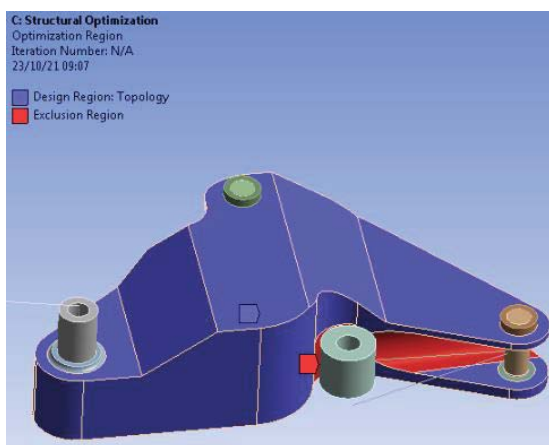
O resultado da tensão máxima de 250,93 MPa que foi encontrado nesta etapa, será utilizado como dado de entrada para a otimização topológica, a partir disso será estabelecido o parâmetro da tensão máxima admissível na otimização. Com base no limite de escoamento do ferro fundido FE 50007, que é de 350 Mpa; pode-se obter o coeficiente de segurança do novo articulador, que é de 1,38.

3.4.7 Configuração dados de saída

Para a configuração dos dados de saída da otimização, algumas condições precisam ser observadas, como por exemplo massa final pretendida para o conjunto otimizado, espessura mínima, regiões onde o projeto necessita que se tenha material e regiões onde está livre para a otimização, máxima tensão admissível e plano de retirada do material considerando o projeto do molde para fundição.

A definição da região onde deve ser mantido o material levou em consideração a montagem do conjunto; com isso, conforme visto na Figura 29 a região em vermelho estará excluída da otimização, já o bloco na cor azul está livre para uma mudança de forma, decorrente da otimização.

Figura 29- Regiões da peça a ser otimizada

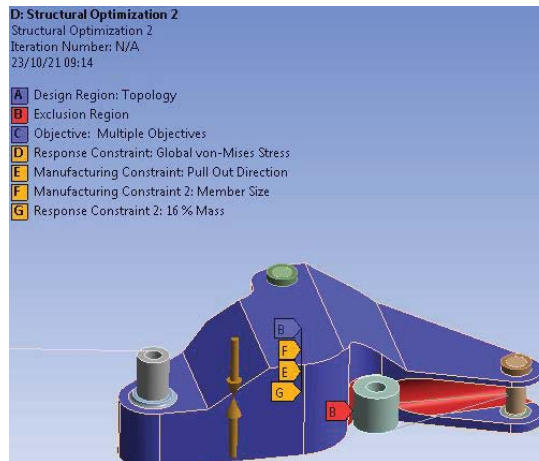


Fonte: Autor, 2021

A restrição de massa do conjunto, levou em consideração o projeto parcial do novo articulador, que para este caso a massa é de 55 kg; e também o requisito de projeto, onde

pretende-se obter um novo articulador que não tenha massa superior a 12 kg; com isso, na região em roxo mostrada na Figura 30, determinou-se que pode ser removido até 84 % da massa da geometria, restando ainda uma margem para ajustes finais em buchas e outros detalhes do projeto.

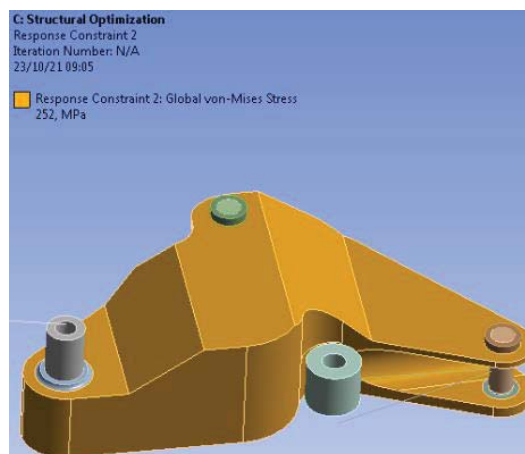
Figura 30- Restrições para a otimização



Fonte: Autor, 2021

Na sequência foi determinado a máxima tensão que o componente pode estar exposto, que para o projeto é de 252 Mpa, essa tensão levou em consideração a máxima tensão gerada na análise estática do projeto parcial, ver Figura 28; contudo, analisando o limite de escoamento do material FE 50007, 350 Mpa, o coeficiente de segurança do articulador é de 1,38; o que traz bons resultados para a otimização de massa pretendida para o conjunto. A Figura 31 mostra a região do articulador onde será aplicado a restrição da tensão.

Figura 31- Máxima tensão para a otimização



Fonte: Autor, 2021

As últimas restrições que foram definidas foram a de espessura mínima, que para este projeto foi definido que nenhuma região da peça poderá apresentar espessura menor que 10 mm, e por fim foi determinado o plano onde será feito a retirada do material, considerando a fabricação do molde de fundição.

3.5 Otimização topológica

Finalizada a etapa de preparação para a otimização topológica, foi iniciado o *solver* no *software*, o resultado esperado da otimização é uma geometria que seja capaz de suportar os esforços aplicados pela força máxima do cilindro, não apresentar regiões onde a tensão ultrapasse 252 MPa e que o peso da peça otimizada não tenha grandes modificações, isso quando comparado ao peso do conjunto que apresentou falha a campo.

Conforme visto na seção 2.5; otimizações topológicas deste tipo estão sujeitas a apresentarem problemas na resolução por parte do *software*, como por exemplo o que é conhecido por tabuleiro de xadrez; caso o resultado da otimização apresente esse tipo de problema, é necessário voltar a etapa de preparação da geometria e reconfigurar alguns dados de entrada, como por exemplo o tamanho e o tipo dos elementos.

3.6 Considerações sobre o projeto do novo componente

A **Fase 3** do projeto do novo articulador; consistiu na preparação da nova geometria ser otimizada, onde foi previamente feito o modelamento parcial do novo articulador para utilização na otimização, esse modelo foi feito com base na geometria do componente soldado que apresentou falha durante sua operação, e nas condições de montagem e manutenção estabelecidas nos requisitos de projeto.

Finalizado o projeto parcial, foi feita a preparação no *software* para a otimização do componente, foram realizadas as simplificações necessárias afim de reduzir o esforço computacional e gerar resultados satisfatórios quanto a otimização do novo articulador. Por fim, resolvido o problema por parte do *software* foi obtido uma geometria otimizada, os resultados serão demonstrados a seguir.

4 RESULTADOS E DISCUSSÕES

Neste capítulo são apresentados os resultados obtidos inicialmente da otimização topológica e as análises feitas para validação da nova geometria, também será apresentado o projeto final, através do modelamento 3D e dos desenhos técnicos para fabricação das peças. Para finalizar foi elaborado uma análise comparativa entre os custos das duas situações, projeto atual do articulador e novo projeto fundido do articulador.

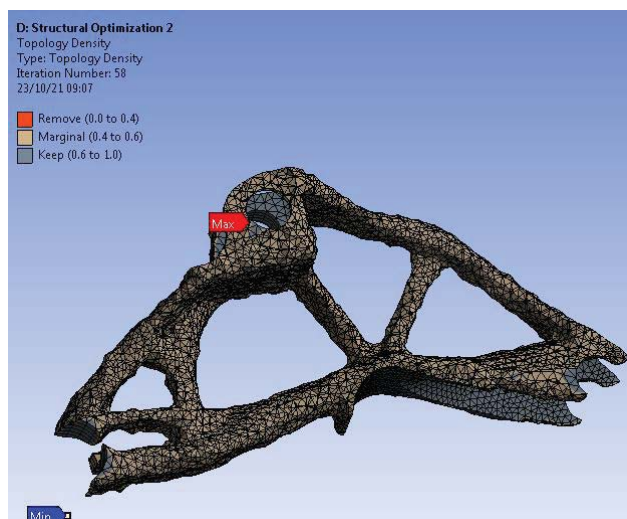
4.1 Fase 4: Interpretação dos resultados

A seguir será apresentado os resultados obtidos, inicialmente na otimização topológica, e por fim, com o objetivo de validação da nova geometria será mostrado os resultados das análises realizadas sobre a geometria otimizada.

4.1.1 Otimização topológica do articulador

Após a convergência do *software*, tem-se a otimização realizada, sendo que a geometria gerada é mostrada na Figura 32. Pode-se notar na imagem, que alguns contornos das buchas estão sem material, porém precisa-se corrigir isso no modelamento final da peça.

Figura 32- Resultado da otimização topológica



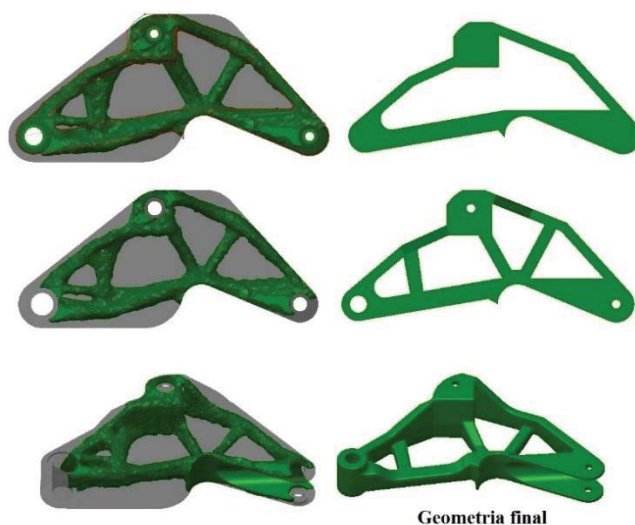
Fonte: Autor, 2021

Como resultado final tem-se uma geometria onde a sua distribuição de material foi otimizada considerando os parâmetros estabelecidos na configuração dos dados de saída, a tensão no articulador não excede o limite de 252 MPa, nenhuma região da peça contém espessura inferior a 10 mm, e massa final da peça otimizada ficou com aproximadamente 9,3 kg. Porém, pode-se notar que algumas regiões da peça necessitam de um modelamento mais refinado, é o caso dos contornos das buchas. Somente no detalhamento final do articulador que será estabelecida a massa final. Basicamente, o resultado da otimização fornece ao projetista uma ideia muito aproximada da geometria final, mas ainda precisa ser ajustada.

4.2 Fase 4: Validação da geometria otimizada

Para a validação final, inicialmente foi exportada a geometria gerada na otimização e com o auxílio de um *software* para modelamento, sendo realizado o projeto final do articulador com a nova geometria. Utilizou-se como base, o projeto parcial do componente e a geometria gerada na otimização, e a partir disto foi feita a modelagem da geometria final do articulador, conforme mostrado na Figura 33.

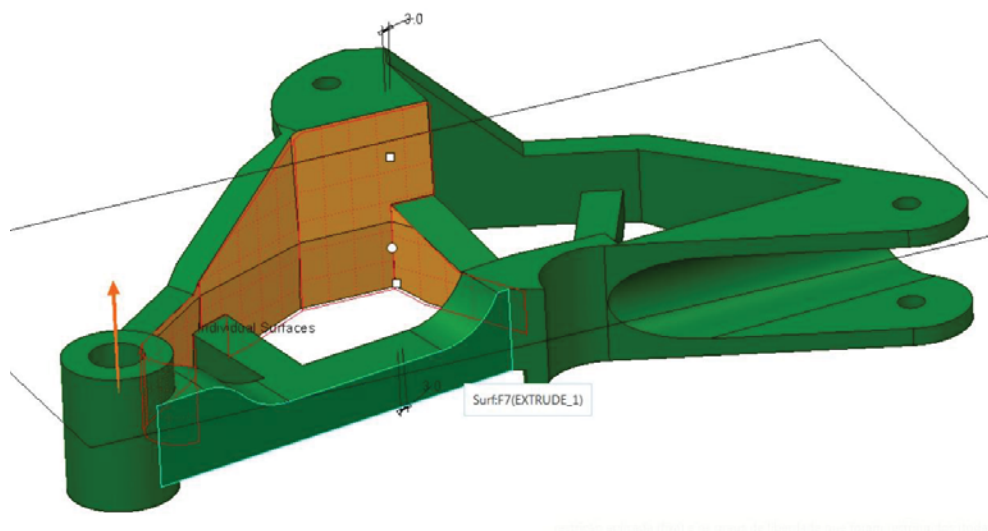
Figura 33- Modelamento da geometria final



Fonte: Autor, 2021

O projeto final do articulador deve conter as condições necessárias para fabricação, como por exemplo prever os ângulos de extração, necessários para a confecção dos moldes de fundição, conforme mostrado na Figura 34.

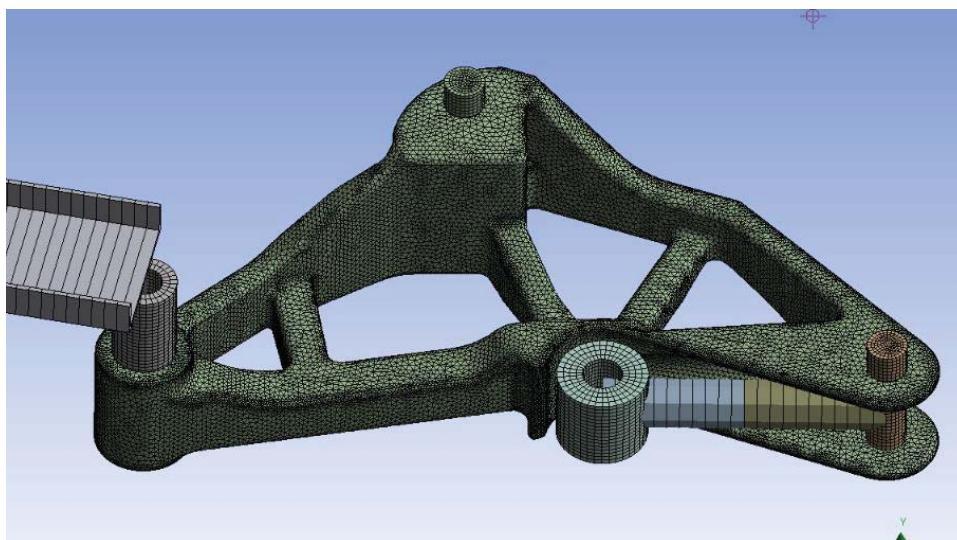
Figura 34- Projeto 3D articulador barra



Fonte: Autor, 2021

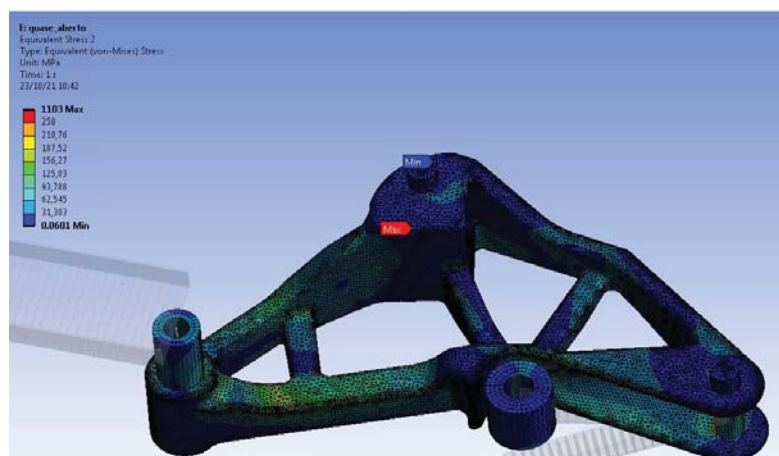
Para validação estrutural da nova geometria, foi realizado uma nova análise estática, porém, considerando agora a nova geometria modelada; os parâmetros selecionados, condições de contorno, restrições e forças utilizados nesta análise foram os mesmos utilizados nas análises anteriores, sendo alterado somente o tamanho dos elementos a fim de melhorar a qualidade da malha. Com isso, para esta validação foi utilizado elemento de ordem linear de tamanho 4 mm, totalizando 488.102 elementos e 710.615 nós, a Figura 35 demonstra a malha gerada sobre a geometria otimizada e a Figura 36 mostra o resultado das tensões encontradas no novo componente.

Figura 35- Malha de elementos finitos sobre a geometria final



Fonte: Autor, 2021

Figura 36- Análise estática geometria final



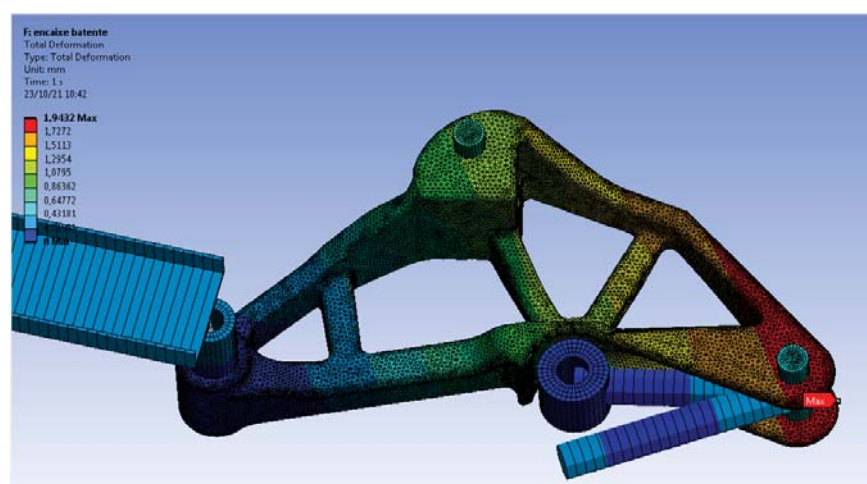
Fonte: Autor, 2021

De uma forma geral, praticamente em toda a geometria da peça a tensão ficou abaixo de 250 Mpa, sendo que apenas em uma região da peça, ficou uma tensão elevada, em torno de 1.100 Mpa. Porém, essa tensão é localizada em um ponto muito pequeno, e próxima ao local de aplicação da força do cilindro, dessa forma não será um problema para o componente.

O critério de análise da tensão que foi utilizado para o projeto, é o critério de *Von Mises*, a definição desse critério, leva em conta o alongamento mínimo do FE 50007 que é de 7%, caso o material utilizado tivesse um alongamento mínimo inferior a 5%, deveria ser utilizado outro critério para validação.

Analisando a deformação total encontrada sobre a nova geometria do componente, pode-se verificar que a mesma ficou em torno de 1,94 mm, conforme mostrado na Figura 37, sendo que o local da máxima deformação se encontra na parte final do articulador, conforme esperado.

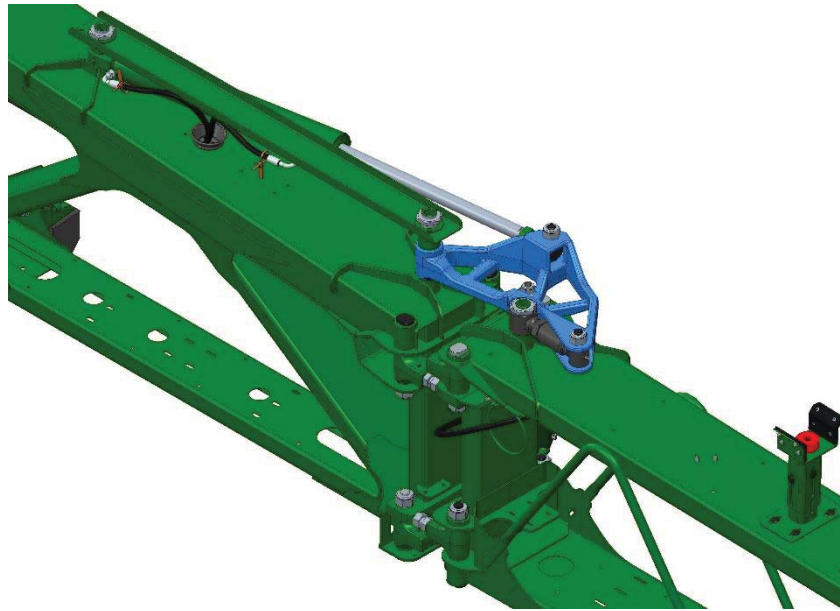
Figura 37- Deformação total do articulador



Fonte: Autor, 2021

E por fim, para validação do projeto, foi realizada a montagem do novo articulador no conjunto de barras do pulverizador, conforme visto na Figura 38, também foi realizado as simulações de movimento do articulador considerando a barra aberta e fechada, analisado possíveis interferências entre demais componentes que são utilizados no projeto, após todas a verificações de projeto necessárias, o próximo passo é o detalhamento dos componentes.

Figura 38- Montagem final do articulador na barra do pulverizador



Fonte: Autor, 2021

Figura 39 – Vista em explosão para montagem



Fonte: Autor, 2021

Finalizada a etapa de validação da nova geometria, onde toda a parte de projeto se encontra concluída, o resultado do final é um articulador capaz de resistir estruturalmente aos esforços que estará sendo exigido. Conforme já mencionado esse componente será fabricado através do processo de fundição, onde o material a ser utilizado é o FE 50007, a massa final do conjunto que será montado na barra ficou com 10,3 kg.

4.3 Fase 5: Detalhamento final do articulador

A fase de detalhamento do novo articulador contempla os desenhos 2D que são necessários para a fabricação dos componentes, conforme descrito no item 3.1; em cada lado das barras do pulverizador deve ser montado um articulador devido a simetria das barras e para simplificação da análise, foi feito o estudo baseado no articulador esquerdo, mas para o projeto final, é necessário também o projeto e detalhamento do articulador direito, que nada mais é do que um espelhamento da peça esquerda.

Para a fabricação, são necessários os desenhos de fundição, onde estão contempladas todas as informações pertinentes ao processo de fundição da peça, cotação de tolerâncias, ângulos de extração, raios de arredondamento, material e etc. mas também são necessários os desenhos para usinagem das peças, nestes desenhos serão descritas as informações necessárias para fazer a fabricação final da peça, partes a serem usinadas, furos, canais para lubrificação, tolerâncias de usinagem, tipo de revestimento; entre outras.

Os desenhos para a fabricação dos articuladores esquerdo e direito encontram-se nos apêndices 1 a 4.

4.4 Fase 6: Avaliações comparativas

Após a finalização do detalhamento dos componentes, pode-se fazer algumas comparações entre os dois projetos de articuladores, enquanto a massa do articulador que apresentou falha é de **9,45 kg**. A massa do novo articulador ficou com **10,3 kg**. A expectativa era de se manter a mesma massa, mas não foi possível, uma vez que o material utilizado no projeto do novo articulador possui limite de escoamento ligeiramente inferior quando comparado com o material do articulador que apresentou falha.

Esse acréscimo de massa no articulador é justificado pelo aumento de resistência adicionado ao componente; levando em consideração o local de montagem do articulador no projeto da barra do pulverizador, o aumento de massa do articulador não será problema, caso o componente fosse montado próximo ao fim da barra, deveria ser reconsiderado a massa final do componente.

Após finalizada a fase de projeto do novo articulador, foi possível estimar o custo por peça; após levantamento junto ao setor de cadastro de materiais foi calculado o custo do novo articulador, por razões de sigilo industrial não será apresentado o valor final do componente. O valor leva em consideração todo o processo produtivo da peça, desde a confecção dos moldes para fundição, processo de fundição, processo de usinagem e ao final a pintura final da peça, entregando assim uma peça pronta para ser montada no pulverizador.

Em uma análise do custo atual do sobre o articulador que apresentou falha a campo, foi apurado que o custo por peça. Para efeito de comparação, foi considerado o custo unitário de cada peça que é necessário para a fabricação do componente, o processo de soldagem e o processo de pintura, da mesma forma sendo a peça pronta para ser montada no pulverizador.

Quando comparado os valores entre os dois modelos de articuladores, temos uma redução de **37,6 %** por peça. Uma das razões dessa diminuição, é em função da diminuição de processos produtivos, outro fator e a eliminação do processo de soldagem, que demanda de mão de obra especializada para a fabricação, encarecendo o valor final dos componentes.

O tempo de fabricação do novo componente também foi avaliado, com base no processo de fundição, o tempo estimado para a fabricação de um articulador é de

aproximadamente 38 minutos, esse tempo leva em consideração todos os processos produtivos da peça, enquanto o tempo atual de fabricação do articulador soldado é de 53 minutos.

5 CONCLUSÕES

O objetivo principal do presente trabalho é o projeto de um componente articulador para a barra de um pulverizador autopropelido, para que seja atendido esse objetivo o estudo da literatura foi muito importante o entendimento conceitual do problema.

Para chegar ao resultado desejado inicialmente foi traçado alguns objetivos para o estudo, como o levantamento de dados de campo do índice de falhas do componente. Na sequência foi concluído a análise e determinação dos carregamentos que o componente estará exposto, esses dados são de extrema importância para a realização do projeto, onde será feita a otimização topológica para o articulador.

Após isso foi desenvolvida uma lista de requisitos e características importantes a serem seguidos para o desenvolvimento do projeto, através desses requisitos foi possível fazer um projeto parcial para o novo articulador.

Com base no projeto parcial do articulador, foi iniciado o estudo de otimização sobre o novo componente, onde através da ferramenta de otimização topológica que está inserida no *software Ansys Workbench*; foi possível encontrar uma boa distribuição de material para o projeto do novo articulador.

O resultado gerado pela otimização topológica não apresenta o projeto finalizado do componente, mas fornece ao projetista uma ideia bem aproximada de como necessita ser a distribuição do material sobre a peça, cabendo ao projetista analisar e adequar o projeto da peça ao processo produtivo.

Após a finalização do projeto do componente, foram realizadas outras análises para fins comprobatórios sobre a resistência estrutural do componente, porém nesta etapa já é considerado a gemeria final do articulador, finalizada a etapa de validação da geometria, a sequência do projeto é o detalhamento final, onde através dos desenhos 3D e 2D, a peça tem a sua forma final definida, todos os detalhes de fabricação são expressos e a partir disso é possível dar sequência no desenvolvimento de ferramentas para a fabricação final.

O resultado do projeto, é um articulador capaz de resistir estruturalmente aos esforços que serão aplicados para realizar a abertura, fechamento e também manter a barra do pulverizador em operação, embora a massa do novo articulador tenha tido um pequeno acréscimo, o valor por peça ainda ficou menor, quando comparado com o articulador que apresentou falha.

Levando em consideração que o atual componente apresentou falhas em trabalho, ainda que tivesse ficado próximos os valores das peças, ainda termos grandes vantagens, devido ao ganho estrutural com a nova geometria do articulador.

Por fim, com a finalização do projeto proposto pelo estudo, o assunto abordado ainda deixa uma ampla margem para pesquisas em possíveis etapas futuras, sendo exequível o aprimoramento de geometrias não só em projeto de componentes fundidos, mas também em etapas iniciais de projetos de máquinas agrícolas.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

AGOSTINHO, O. L.; VILELLA, R. C.; BUTTON, S. T. **Processos de Fabricação e Planejamento de Processos**. Universidade Estadual de Campinas. Campinas. 2004.

ALVES FILHO, A. **Elementos finitos: a base da tecnologia CAE**. 6ª. ed. São Paulo: Erica, 2013.

ARAÚJO, B. H. B. **Mecanização: operação de pulverizadores autopropelidos**. Brasília. 2016.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR14001: Sistemas da gestão ambiental Requisitos com orientações para uso**. Rio de Janeiro. 2004.

AZEVEDO, Á. F. M. **Método dos Elementos Finitos**. Porto: Universidade do Porto, 2003.

BALASTRAIRE, L. A. **Máquinas Agrícolas**. São Paulo: Câmara Brasileira do Livro, 2004.

BALDAM, R. D. L.; VIEIRA, E. A. **Fundição: Processos e tecnologias Correlatas**. São Paulo: Érica, 2014.

CHIAVERINI, V. **Aços e ferros fundidos**. São Paulo: Associação Brasileira de Metalurgia e Materiais, 2005.

FERREIRA, J. M. G. D. C. **Tecnologia da Fundição**. Lisboa: Fundação Calouste Gulbenkian, 1999.

JUNIOR, L. P. D. S. C.; CABRAL, T. D. S. **Especificação de Procedimentos de Soldagem MIG para o Preenchimento de Cavidades pela Técnica de Camadas Sucessivas**. Universidade Federal do Pará. Belém. 2008.

MORISHITA, G. S. D. L. **Otimização Topológica de Mecanismo de Quatro Barras**. Universidade Tecnológica Federal do Paraná.. Curitiba. 2015.

NEUFEL, M. Pulverizador agrícola: tudo o que você precisa saber, 18 mar. 2021. Disponível em: <<https://blog.jacto.com.br/pulverizador-agricola-tudo-o-que-voce-precisa-saber/>>.

PAHL, G. et al. **Projeto na Engenharia - Fundamentos do desenvolvimento eficaz de produtos - Métodos e aplicações**. 6ª. ed. [S.l.]: Edgard Blücher, 2005.

PAHL, G. et al. **Projeto na Engenharia**. 6ª. ed. [S.l.]: Edgar Blücher, 2011.

ROSSITTI, S. M. **Processos e Variáveis de Fundição**. Grupo Metal. [S.l.]. 1993.

SIMONETTI, H. L. **Otimização Topológica de estruturas bidimensionais**. Universidade Federal de Ouro Preto. Ouro Preto. 2009.

STARA. **Stara S/A Industria de Implementos Agrícolas**, 2021. Disponível em: <www.stara.com.br>. Acesso em: 10 Abril 2017.

VITORINO, A. **OTIMIZAÇÃO TOPOLÓGICA DE ESTRUTURAS TRIDIMENSIONAIS**. UNIVERSIDADE ESTADUAL DE CAMPINAS. campinas. 2019.

Apêndice 1 – Desenho para fundição articulador barra esquerda

40

Apêndice 2 – Desenho para fundição articulador barra direita

[illegible]

