

# **ESTUDO, ANÁLISE E ACOMPANHAMENTO DA IMPLANTAÇÃO DO SOFTWARE “SIMUFACT WELDING” NO PROCESSO DE SOLDAGEM DE UMA NO INDÚSTRIA METALÚRGICA NO SETOR AGRÍCOLA.**

**Autor 1 – João Pedro Battezini do Nascimento**

[141149@upf.br](mailto:141149@upf.br)

**Autor 2 – Prof. Me. Rubens Stuginski Júnior**

**Comissão Examinadora – Auro Candido Marcolan, Willian Haupt**

## **RESUMO**

Dentre os principais processos de fabricação, a soldagem é sem dúvidas, um dos mais importantes. No entanto, processos de soldagem produzem muitos defeitos e o empenamento é um deles. Esse defeito torna a montagem de conjuntos soldados bastante onerosa, pois implica, quase sempre em retrabalhos e descartes de conjuntos soldados. Neste trabalho é analisado a implantação de um software para auxílio no processo de soldagem com a previsão das deformações e a possibilidade de previsão do posicionamento de fixadores no gabarito para diminuir e mesmo evitar a deformação além de limites que inviabilizam a montagem correta do conjunto. São apresentadas análise de peças de um implemento agrícola em condições de linha de montagem. Primeiro um tubo é analisado e sua deformação determinada. Após a simulação do processo de solda são implementados fixadores em locais indicados na simulação e esses problemas foram solucionados. Outra peça analisada é o chassi desse implemento que possui um comprimento de 4800 mm onde as deformações advindas do processo de soldagem são graves e como possível solução, foi se dado o “desmembramento” do mesmo em duas longarinas. A simulação indica uma redução drástica desse problema. O gabarito para soldagem desse componente encontra-se em estágio de construção e deverá entrar em funcionamento em breve.

Palavras-chave: Software, Simulação, Soldagem

## **1 INTRODUÇÃO**

Nos dias atuais verifica-se uma evolução constante no quesito de novas tecnologias para o campo, porém que para isso seja efetuado com alta qualidade e confiabilidade, é necessário que os processos de fabricações primários também tenham novas tecnologias. Dessa forma pretende-se, nesse estudo, abranger os impactos com a utilização de um *software* focado no processo de soldagem que influencia diretamente na qualidade final de máquinas e implementos agrícolas.

Nos últimos anos verificou-se um crescimento significativo na produção de grãos no Brasil e no mundo, se comparamos a safra 2018/19 com a de 2019/20, só no Brasil teve-se um aumento de 4,5% ou 11 milhões de toneladas. (CONAB, 2021). Isso obriga as indústrias de implementos agrícolas a produzirem mais implementos e cada vez com melhores qualidades. No processo de fabricação de implementos a união por solda é muito utilizada e também fonte de defeitos. O uso deste *software* vem ajudar para aumento na produção e na diminuição desses

defeitos. O *software* usa a simulação por elementos finitos para prever os possíveis problemas que podem ocorrer durante o processo de solda, durante o processo de fabricação dos produtos. Assim, esta análise deverá considerar, além de custos, as melhorias no processo, as reduções de retrabalhos e aumento de qualidade do produto final dos conjuntos soldados.

O *Simufact Welding* que é um software focado na simulação de processo de soldagem, conseguindo avaliar, calcular e simular todas as variações que o processo traz como empenamento, ovalização, alteração da microestrutura entre outros. Isso aumenta a confiabilidade do processo e qualidade dos conjuntos soldados, reduzindo retrabalhos e lotes pilotos, facilitando encontrar os pontos “críticos” de cada conjunto.

## **1.1 Objetivos Gerais e Específicos**

Este trabalho tem como objetivo o estudo e análise do impacto da implantação de um software de automatização do processo de soldagem em uma indústria de implementos agrícolas. Faz parte, também deste trabalho o acompanhamento técnico da implantação do referido software.

Para que o objetivo geral possa ser concluído, os seguintes objetivos específicos serão trabalhados:

- Estudo do processo de soldagem e seus defeitos;
- Estudo do software “*Simufact Welding*” para aplicação em processos soldagem.
- Realizar simulação e comparação dos resultados obtidos na simulação com aqueles da linha de produção.

## **2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA**

Será feito o embasamento teórico do tema abordado, tendo como base materiais existentes na literatura e em artigos acadêmicos, que se relacionem ao assunto tratado neste Trabalho Final de Graduação.

### **2.1 Processos de Soldagem**

É denominado processo de soldagem a união entre duas peças ou objetos metálicos, utilizando-se do calor para soldar os materiais, ou seja, unindo os mesmos. Conforme escrito na revista (ESAB, 2005). Antes de 1880 só existia soldagem nas forjarias, os métodos atuais mais básicos (soldagem a gás, soldagem a arco e soldagem por resistência) foram criados antes da Primeira Guerra Mundial, quando surge a grande demanda e necessidade para construção de navios e aviões.

No início, a soldagem era considerada um processo de união, porém hoje em dia, com o aumento das tecnologias, já se possui processos de soldagem com a deposição de material, tendo como objetivo a recuperação de materiais desgastados ou para fazer um tipo de revestimento.

Hoje em dia, existem diversos tipos de soldagem, onde são classificados pelo tipo de processo que cada material é contido.

“A soldagem envolve muitos fenômenos metalúrgicos como, por exemplo, fusão, solidificação, transformações no estado sólido, deformações causadas pelo calor e tensões de contração, que podem causar muitos problemas práticos. Os problemas podem ser evitados ou resolvidos aplicando-se princípios metalúrgicos apropriados ao processo de soldagem” (MODENESI; MARQUES; SANTOS, 2001, p.3).

#### **2.1.1 Soldagem por arco**

Os principais processos de soldagem por arco são:

- Eletrodo revestido

A soldagem por arco elétrico com eletrodo revestido (Shielded Metal Arc Welding – SMAW) é realizada pelo calor do arco elétrico entre dois corpos metálicos, a ponta de um eletrodo metálico revestido com a peça metálica

- Arco submerso

A soldagem por arco submerso (Submerged Arc Welding - SAW) é realizada pela formação de um arco entre a peça e o final do consumível, onde ambos estão inseridos em uma camada de fluxo granular (por isso o nome submerso), o arco fica completamente escondido.

- Soldagem por laser

A soldagem por laser (Laser Beam Welding – LBW) é realizada pela fusão da junta através de bombardeamentos de feixes de luz concentrada.

- Soldagem por plasma

A soldagem por plasma (Plasma Arc Welding – PAW) é realizada pela fusão dos metais provocadas por um arco elétrico constrito, assentado entre o eletrodo de tungstênio e a peça metálica.

- Soldagem por eletro escória

A soldagem por eletro escória (Electro Slag Welding – ESW) não é um processo a arco, o arco é utilizado somente para dar início ao processo, é realizada pela fusão do metal de adição com as partes a unir, por meio do calor criado pela corrente elétrica por uma poça de escória fundida a aproximadamente 1700°C.

- Soldagem por feixe de elétrons

A soldagem por feixe de elétrons (Electron Beam Welding – EBW) é chamada de alta intensidade pois há uma grande quantia de energia emitida em um curto espaço de tempo, dessa forma o impacto dos elétrons gera calor que otimizados geram a soldagem.

### **2.1.2 Soldagem no estado sólido**

Os principais processos de soldagem no estado sólido são:

- Soldagem por explosão

A soldagem por explosão (Explosion Welding – EXW) é um processo normalmente chamado de colagem explosiva que ocorre no estado sólido a partir da deformação plástica dos metais. É gerado através da colisão de uma peça lançada a uma alta velocidade contra a outra através da detonação calculada de um explosivo.

- Soldagem por fricção

A soldagem por atrito (Friction Stir Welding – FSW) é um processo que ocorre no estado sólido, visando unir corpos metálicos através de caldeamento, gerado pelo calor criado através do atrito provocado pelo movimento das superfícies em contato.

### 2.1.3 Soldagem por fusão

Os principais processos de soldagem por fusão são:

- Soldagem por resistência

A soldagem por resistência (Electric Resistance Welding – ERW) agrega vários processos em que o calor de soldagem tem sua origem pela resistência de um fluxo de corrente elétrica que cruza as partes que serão unificadas. Processo utilizado na maioria das vezes para soldar juntas sobrepostas com espessuras diferentes.

- Soldagem oxi-acetilênica

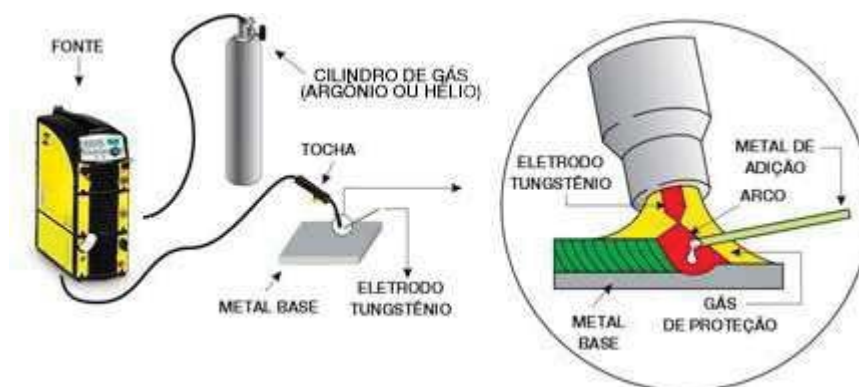
A soldagem oxiacetilênica (OxyAcetylene Welding – OAW) é um processo onde a união das peças metálicas é gerado pela combustão de mistura de gases (Oxigênio e Acetileno).

### 2.1.4 Soldagem TIG ou GTAW

A soldagem TIG (Tungsten Inert Gas) ou GTAW (Gas-Shielded Tungsten Arc Welding) é um processo de soldagem que se utiliza de um eletrodo sólido de tungstênio que não é consumível. Todo o processo é protegido por uma atmosfera com gás inerte. Esse método de soldagem, produz uma solda de alta qualidade, como não é gerado resíduos, não há chances de inclusão da mesma no metal de solda, sendo assim gerando uma solda limpa e sem necessidade de limpeza ao final do processo.

A soldagem TIG é utilizada para a maioria dos metais e pode ser efetuado manualmente ou por processos automáticos. Sua utilização apesar de abranger grande parte dos metais, é focada principalmente em soldas de alumínio e ligas de aço inoxidável onde a completude da solda é de grande importância.

Figura 1 - Ilustração processo TIG



Fonte:(ESAB, 2021)

Suas aplicações são principalmente na soldagem de tubos e chapas com pequenas espessuras, manutenção e reparos gerais, passe raiz em tubos com diversos diâmetros e espessuras. Seus parâmetros variam conforme Tabela 1.

Tabela 1 - Parâmetros e condições

|                                       |             |           |            |
|---------------------------------------|-------------|-----------|------------|
| Espessura da junta (mm)               | 1,6-3,2     | 3,2-6,4   | 6,4-12,7   |
| Tipo de Junta                         | Sem chanfro | V         | Duplo V    |
| Corrente (A)                          | 50-100      | 70-120    | 90-150     |
| Tensão (V)                            | 12          | 12        | 12         |
| Tipo de eletrodo                      | EWTh-2      | EWTh-2    | EWTh-2     |
| Diâmetro do eletrodo (mm)             | 2,4         | 2,4       | 3,2        |
| Metal de adição (mm)                  | 1,6-2,4     | 2,4-3,2   | 2,4-3,2    |
| Gás de proteção                       | Argônio     | Argônio   | Argônio    |
| Vazão (L/min)                         | 7,0-10,0    | 7,0-10,0  | 10,0-12,0  |
| Tamanho do bocal (mm)                 | 9,5(3/8)"   | 9,5(3/8)" | 12,7(1/2)" |
| Distância máxima do bocal a peça (mm) | 12,7        | 12,7      | 12,7       |

Fonte: Autor, 2021

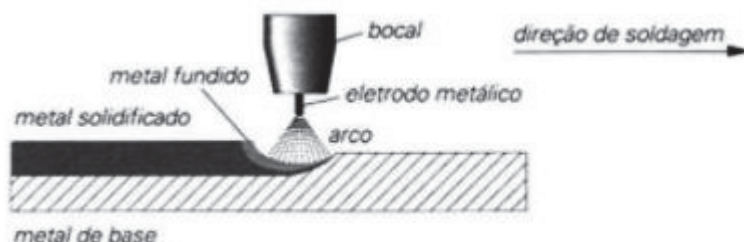
As principais vantagens do processo são principalmente o elevado controle da poça de fusão, ótima qualidade das propriedades mecânicas e acabamento, possibilita soldagem em chapas muito finas, sua vasta gama de possíveis ligas metálicas para serem soldadas e o processo não apresenta escória, respingo ou fumos de soldagem. Suas desvantagens são a baixa taxa de deposição, a baixa tolerância a contaminantes e a necessidade de um soldador com experiência para controlar a poça de fusão.

### 2.1.5 Soldagem MIG-MAG ou GMAW

As primeiras ideias que se teve sobre o processo de soldagem GMAW foi em 1920, porém comercialmente somente em 1948. Inicialmente, se empregou um gás inerte como proteção na soldagem do alumínio, assim surgindo o termo soldagem MIG, que ainda é uma referência no processo. Com o passar do tempo, foi se desenvolvendo atividades com correntes contínuas pulsadas e baixas densidades, conseguindo ser utilizada em um “leque” muito grande de materiais metálicos, utilizando-se principalmente como gás de proteção ativo ou reativo o dióxido de carbono (CO<sub>2</sub>) e mistura de gases. Após esse desenvolvimento, começou formalmente a se chamar o processo pelo termo GMAW (*Gas Metal Arc Welding*) visto que os gases inertes e reativos são empregados. Porém, quando se emprega gases reativos, normalmente é comum usar o termo MAG (*Metal Active Gas*) (ESAB, 2005).

Na soldagem MIG/MAG (*Metal Inert Gas/Metal Active Gas*), estabelece-se um arco elétrico entre o consumível na forma de arame e a peça. Esse arco faz a fundição contínua do arame conforme é alimentado pela poça de fusão.

Figura 2 - Ilustração processo MIG/MAG



Fonte: Info Solda (2021)

Suas aplicações são muito utilizadas na indústria automobilística e implementos agrícolas, automatizada ou não, na indústria ferroviária e na fabricação de vigas e pontes rolantes.

## 2.2 DEFEITOS NA SOLDAGEM

Os defeitos ou discontinuidades na soldagem são todo o tipo de interrupção que ocorre na estrutura típica de uma junta de solda, o livro *Welding Inspection*, da *American Welding Society* informa que há três tipos básicos de discontinuidades: Descontinuidade dimensional, descontinuidade estrutural e propriedades inadequadas.

### 2.2.1 Descontinuidade Dimensional

“Para a fabricação de uma estrutura soldada, é necessário que tanto a estrutura como as suas soldas tenham dimensões e formas similares (dentro das tolerâncias exigidas) às indicadas em desenhos, projetos ou contratos” (LUCA, 2014)

- A distorção e/ou deformação

São uma mudança da forma do conjunto ou peças soldadas em razão das deformações térmicas que o material sofre ao longo do processo de soldagem. Os principais meios para garantir ou corrigir esse defeito são: sequenciamento da peça informado o passo a passo que deverá ser seguido pelo operador ou robô, admissão de técnicas especiais para a deposição da solda, revisão do projeto do conjunto ou peça e remoção e/ou reparo da solda com descontinuidade.

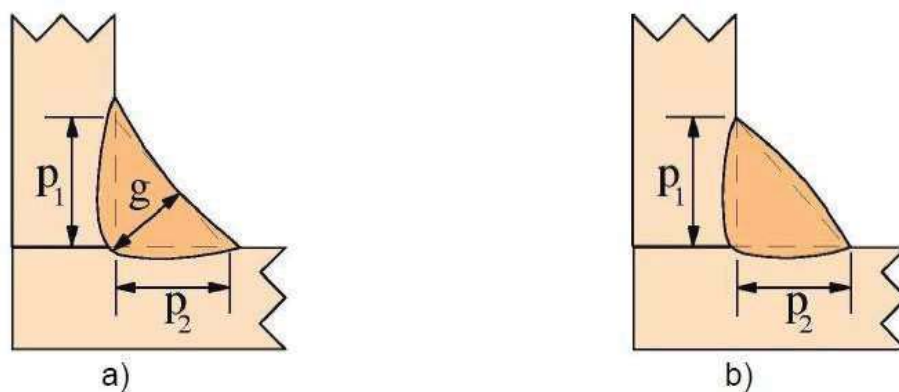
- A preparação incorreta da junta:

Esse defeito gerado ao produzir um chanfro fora das especificações, esse defeito gera um aumento nas descontinuidades estruturais na solda, sendo necessário retrabalhar o chanfro antes da soldagem.

- O não atendimento das dimensões dos cordões de solda:

São especificados os cordões de solda para atender requisitos como resistência mecânica. Cordões de soldas que não atendem as dimensões solicitadas, são consideradas irregulares e podem causar defeitos como a distorção do material pelo excesso de solda depositado.

Figura 3 - Perfis de soldas de filete e suas dimensões: (P1 e P2 – Pernas) e (g – Garganta)



Fonte: (LUCA, 2014)

### 2.3 Simufact Welding

O processo de soldagem é um dos processos complexos que possui diversas variáveis, ou seja, efeitos indesejáveis na hora de produzir determinado produto ou fazer a manutenção do mesmo. O processo possui distorções, variações nas tolerâncias dimensionais ou geométricas (ovalização, concentricidade, planicidade e empenamento), sendo assim, fatores que influenciam na qualidade de determinado material e prejudicando diretamente os lucros da empresa por causa de retrabalhos e sequenciamentos por tentativa e erro para conseguir acertar o processo de determinado material.

O software *Simufact Welding*, é um simulador que utiliza a tecnologia CAE (método dos elementos finitos) que utiliza a divisão de um determinado objeto em análise em finitos elementos, determinando o tipo, tamanho, quantidade e formulação de cada elemento, para assim conseguir gerar uma simulação numérica com o objetivo de chegar nos resultados termomecânicos (distorções, tensões residuais, temperaturas e pontos críticos) antes mesmo de ter feito o lote piloto.

### 3 METODOLOGIA

Foram analisados os itens críticos da empresa, ou seja, itens que possuem retrabalho, que tem alto custo de produção e itens que não atendem aos requisitos geométricos. Após essa análise, verificou-se que uma opção para solucionar e/ou melhorar os problemas dos itens críticos seria a obtenção de um software que simulasse os efeitos causados pela solda.

Após pesquisas de mercado visando a escolha de um software com melhor “custo benefício”, foi adquirido a licença do software *Simufact Welding*. Este software consegue simular as variações que a peça ou conjunto pode sofrer durante o processo de soldagem, devido as deformações causadas pelo calor produzido durante a soldagem.

Para o desenvolvimento do projeto de implantação do *Simufact Welding*, foi efetuada uma busca nas bibliografias com o objetivo de aprofundar o conhecimento sobre o processo de soldagem e o funcionamento do simulador, a fim de analisar os principais problemas que acontecem no processo e solucioná-los para uma melhor qualidade e/ou uma redução de valores no processo de soldagem em uma indústria metal agrícola. Foi adquirido um computador de alta performance para que as análises pudessem ser realizadas com agilidade e qualidade.

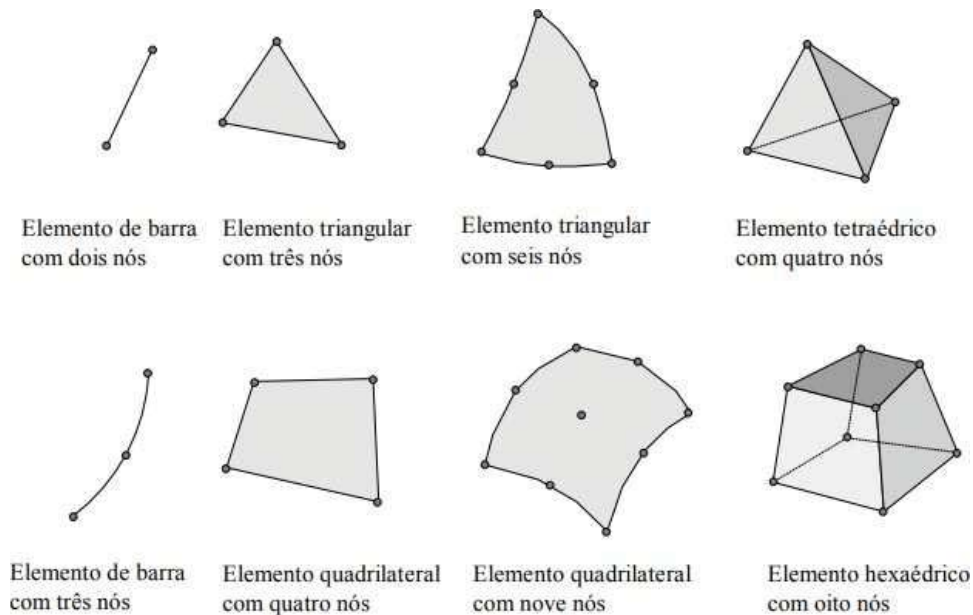
A implantação do software ocorreu em seis etapas que são:

- Pré-processamento
- Processamento
- Pós-processamento
- Calibração do aporte térmico (*heat source*)
- Validação de materiais
- Análise piloto

#### 3.1 Pré-processamento

O pré-processamento é onde gera-se a “malha”, que é a peça e/ou conjunto avaliado dividido em pequenos elementos, para isso, utilizou-se o software *MSC APEX*, a partir da peça que estava projetada no software *CREO*. Durante a exportação é feita a escolha do tipo de elemento para elaboração da malha conforme figura 4.

Figura 4 - Tipos de elementos

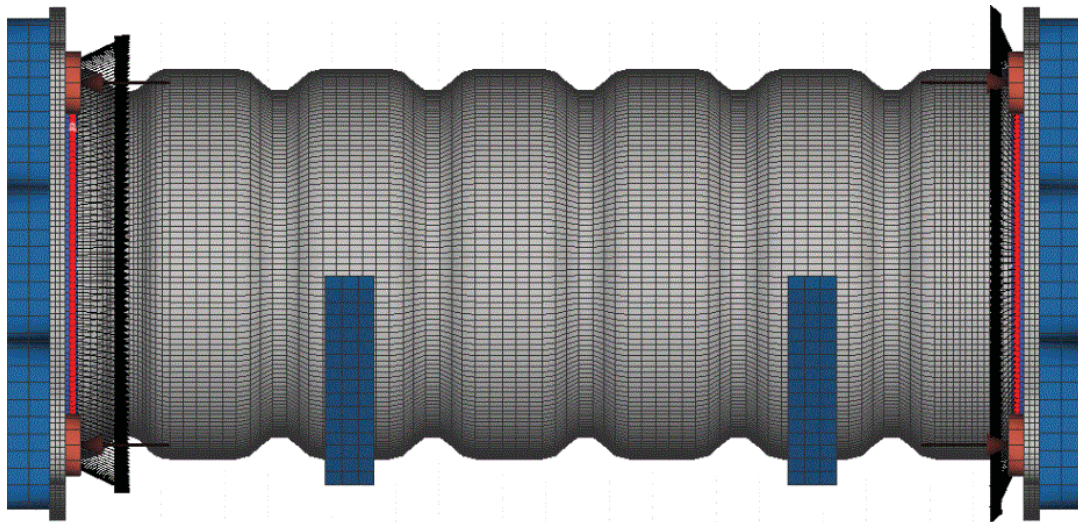


Fonte: (DE SOUZA, 2003)

Após a escolha do tipo de elemento, a malha é refinada nas regiões críticas e/ou de interesse. Quanto maior o número de elementos presente na malha, mais detalhado serão os resultados produzidos e maior o tempo de processamento. A figura 5 mostra o exemplo de uma malha.

Na maioria das vezes deixa-se elementos grosseiros onde não são pontos de interesse pois caso toda malha fosse refinada, o tempo de simulação seria muito grande, o que poderia inviabilizar a simulação com os recursos compatíveis disponíveis.

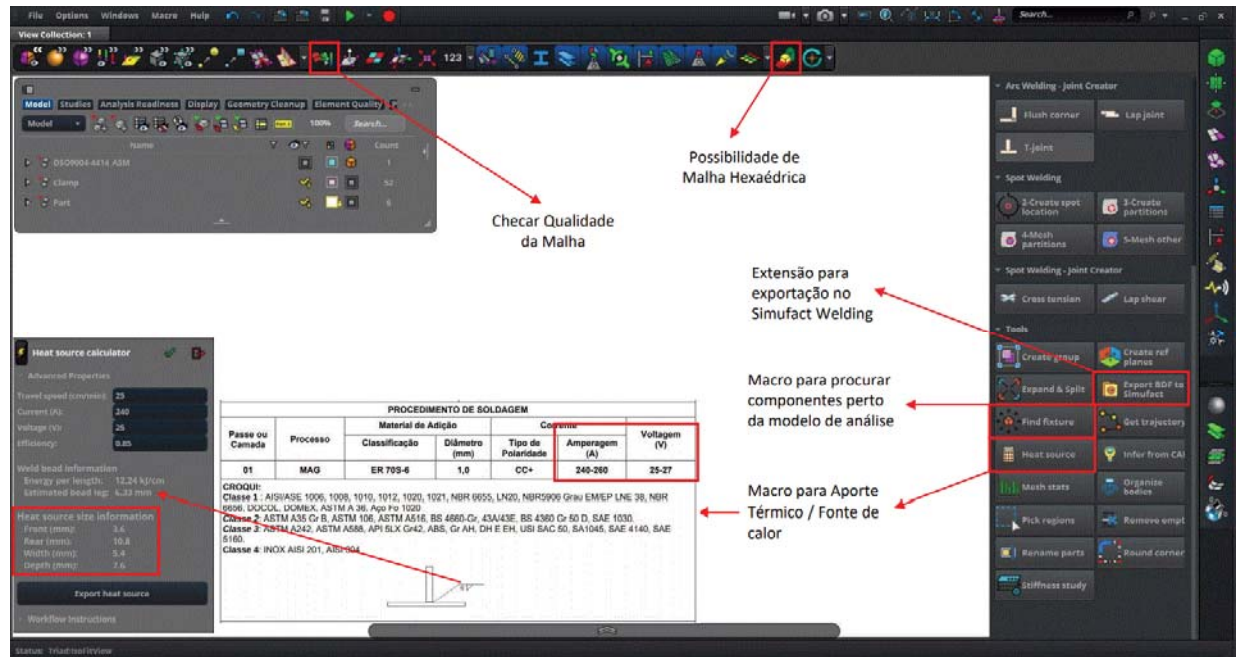
Figura 5 - Exemplo de malha



Fonte: Autor, 2021

Na figura 6 pode-se observar a interface do simulador *MSC APEX*, com os principais ícones destacados e com uma breve descrição de seu uso.

Figura 6 - Interface MSC APEX



Fonte: Autor, 2021

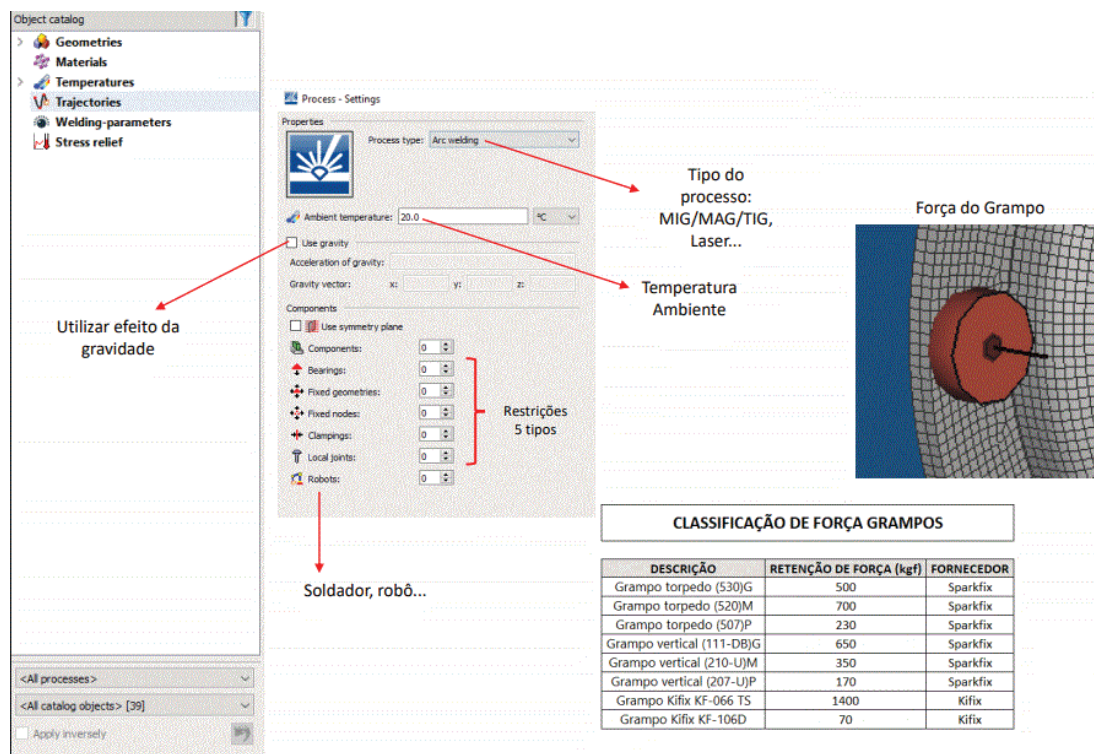
## 1.1 Processamento

Durante a etapa do processamento é feita a exportação da geometria (malha) em formato BDF do software *MSC APEX* para o *Simufact Welding*. No primeiro momento, seleciona-se os tipos de materiais de base e adição para padronizar as propriedades de cada material e aplica-se as condições de contorno, ou seja, restrições, forças de grampeamento, tempos e sequenciamento conforme mostra a figura 7.

Na sequência é feito a trajetória de soldagem informando o caminho que será percorrido durante a simulação, informada a posição da tocha, insere-se os parâmetros de soldagem: geometria e poço. As posições de soldagem não influenciam nada no software, porém para a simulação ficar mais realistas essas informações são usadas.

É avaliado a tendência de deformação natural do material, sem um dispositivo para fazer a fixação, determinado os pontos que vão possuir o maior deslocamento e assim localizado quais serão as necessidades de restrições. Após a análise é simulado o modelo com as restrições estabelecidas.

Figura 7 - Restrição das condições de contorno



Fonte: Autor, 2021

## 1.2 Pós-processamento

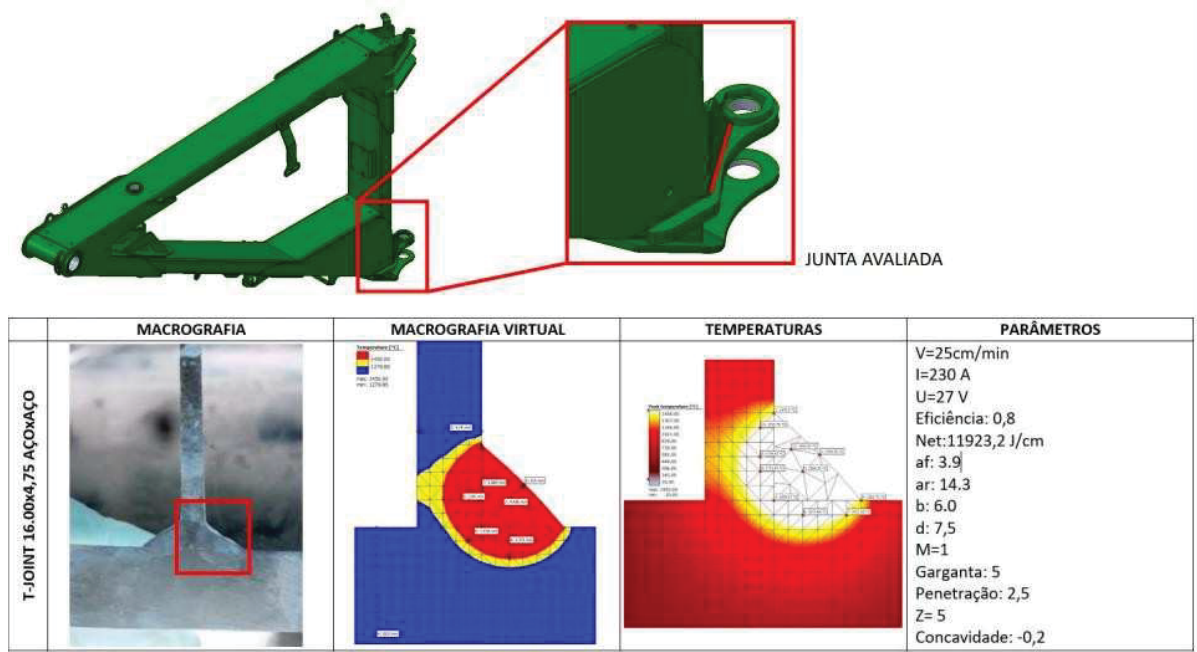
No pós-processamento são analisados os resultados térmicos (temperatura e temperatura de pico) e resultados termomecânicos (deslocamento e tensão residual), o tempo de processo, tempo de resfriamento, comprimento da solda, macrografia virtual, sequenciamento de solda (efetuado várias análises para encontrar o melhor) e otimização dos pontos de fixação do DSO (dispositivo de solda).

## 1.3 Calibração do aporte térmic (heat source)

Para a calibração, são necessários três parâmetros bem definidos: corrente, tensão e velocidade de solda, que são obtidos fazendo a análise referente ao tipo de material, espessura das juntas e tipo de processo, sendo assim, criando a IPS (Instrução do Processo de Solda) que nada mais é do que um guia padronizado dos parâmetros citados a cima.

Deve ser feito uma análise de macrografia em uma peça de teste conforme mostrado na figura 8 para assim termos as medidas e estima-se a poça de fusão no *Simufact Welding*.

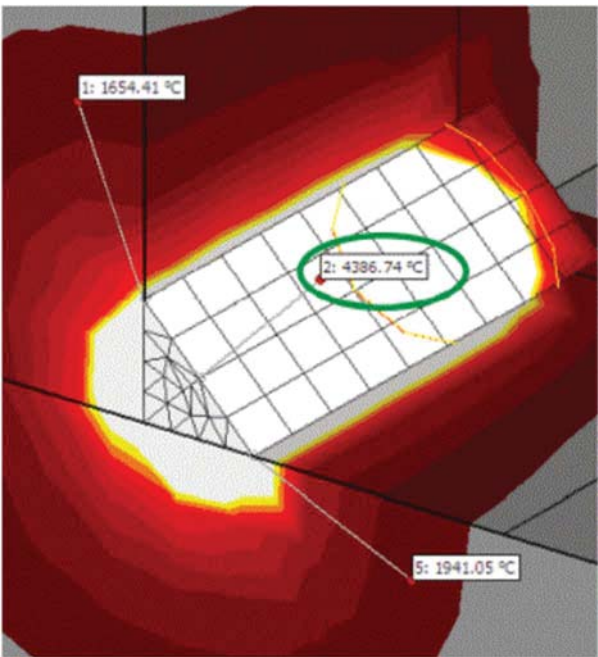
Figura 8 - Macrografia (Real/Virtual)



Fonte: Autor, 2021

É realizada a calibração do aporte térmico analisando vários casos que podem ocorrer, conforme é ilustrado na figura 9, 10 e 11. Pode-se observar três casos que acontecem por erro de calibração.

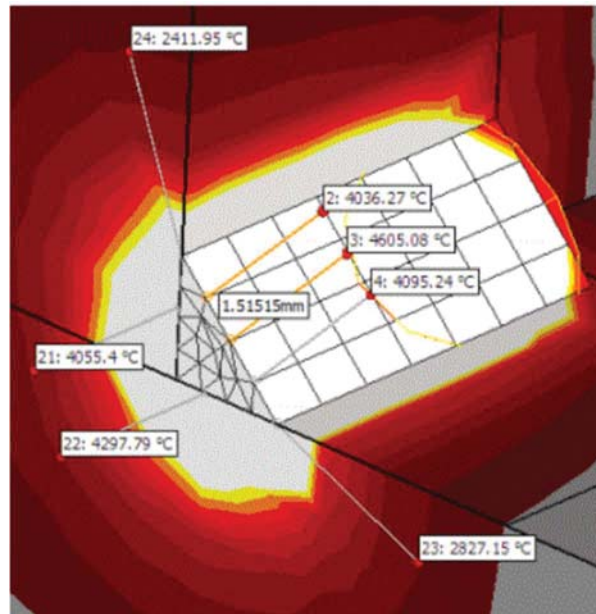
Figura 9 - Heat Source: Exemplo 1



Fonte: Autor, 2021

No primeiro exemplo, figura 9, pode-se observar que a energia está concentrada somente no centro do cordão, atingindo temperaturas em torno de 4000°C e no contorno temperaturas abaixo de 2000°C, sendo assim ocorre uma fusão baixa entre o cordão e peça possibilitando a quebra da mesma se submetida em algum esforço.

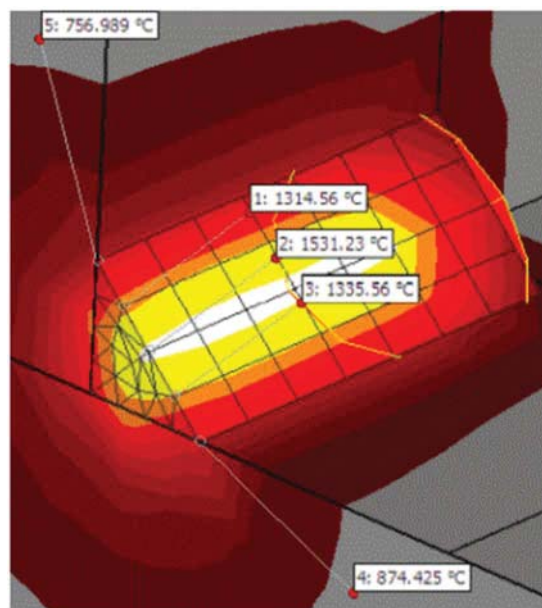
Figura 10 - Heat Source: Exemplo 2



Fonte: Autor, 2021

No segundo exemplo, figura 10, exemplo pode-se observar que a junta inteira está com temperaturas acima de 4000°C, causando problemas como alteração nas propriedades dos materiais e aumentando a fragilidade da peça, necessitando assim diminuir o fluxo de calor para atingir as temperaturas ideais de soldagem.

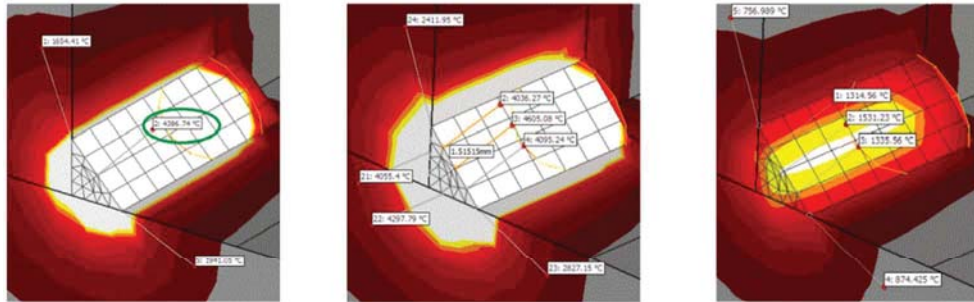
Figura 11 - Heat Source: Exemplo 3



Fonte: Autor, 2021

No último quadro, figura 11, pode-se observar que não chega a ter a fusão entre o material e o cordão de solda, pois a maior temperatura está em torno de 1500°C no próprio cordão, sendo necessário um aumento nos parâmetros de soldagem (voltagem e amperagem) para conseguir assim uma solda adequada.

Figura 12 - Comparação do aporte térmico



TEMPERATURA DE FUSÃO DO AÇO – 1450°C à 1550°C  
TEMPERATURA DE EBULIÇÃO DO AÇO – 2730°C

CALIBRAR PARÂMETROS DO SOFTWARE!

Fonte: Autor, 2021

Para melhor comparação, a figura 12 reapresenta os três defeitos, lado a lado.

#### 1.4 Validação/calibração de materias

Nessa etapa são padronizados os materiais no *Simufact Welding* conforme as normas SAE e AISI/ABNT para que durante a simulação, as propriedades mecânicas sejam os mesmos daqueles utilizados no dia a dia. A tabela 2 mostra alguns itens que foram cadastrados no banco de dados do simulador junto com os certificados de qualidade dos fornecedores e os resultados dos ensaios de tração.

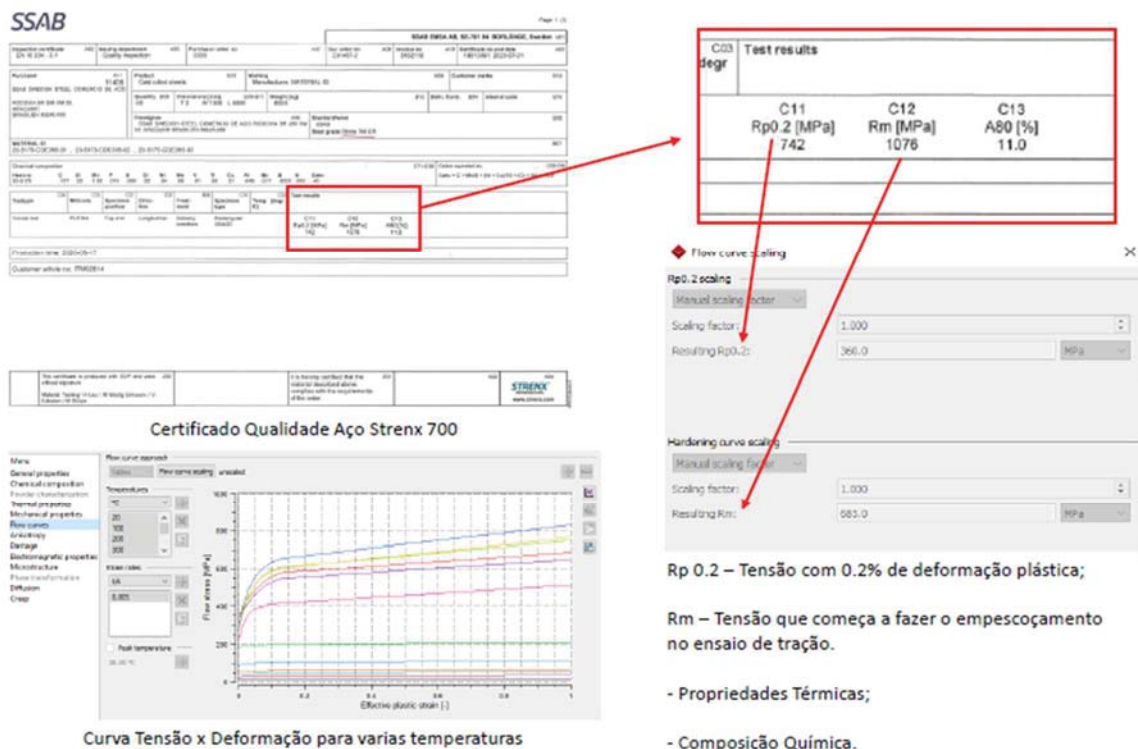
Tabela 2 – Normas e certificados

| MATERIAL        |                            | SIMILAR SIMUFACT        | Rp 0.2 (Mpa) | Rm (Mpa) | NORMA | CERTIFICADO QUALIDADE | ENSAIO TRAÇÃO |
|-----------------|----------------------------|-------------------------|--------------|----------|-------|-----------------------|---------------|
| CHAPAS          | NBR 6656 LNE 380           | S355J2G3-SPM            | 360          | 685      | OK    | OK                    | OK            |
|                 | NBR 6656 LNE 600           | S355J2G3-SPM            | 600          | 820      | OK    | OK                    | OK            |
|                 | NBR 5906 EPA               |                         |              |          | OK    | OK                    | OK            |
|                 | SAE 1010/12                | C10_c                   | 259,84       | -        |       | OK                    | -             |
|                 | SAE 1020/26                |                         |              |          |       | OK                    | -             |
|                 | SAE 1045                   |                         |              |          |       | OK                    | -             |
|                 | SAE 6006                   |                         |              |          |       |                       |               |
|                 | ASTM A572-G50              |                         |              |          | OK    | OK                    | OK            |
|                 | A36                        | S235-SPM                | 251          | 601      | OK    | OK                    | OK            |
|                 | STRENX 700 MC              |                         | 700          | 780-930  |       | OK                    | OK            |
|                 | AISI 304                   | X5CrNi18-10             | 294,01       | 588,14   |       | OK                    | OK            |
|                 | AISI 316                   | 316H-sw                 | 264,6        | 588,4    |       |                       |               |
|                 | AL 5052H34                 |                         |              |          |       |                       |               |
| TUBOS           | TUBO IND. NBR 6591         |                         |              |          | OK    | OK                    | -             |
|                 | TUBO TREF. NBR 8476        |                         |              |          |       | OK                    | OK            |
|                 | TUBO COND NBR 5580         |                         |              |          | OK    |                       |               |
|                 | TUBO IND NBR 5590          |                         |              |          | OK    | OK                    | OK            |
|                 | TUBO IND NBR 8261          |                         |              |          |       | OK                    | -             |
|                 | TUBO TREF. NBR 5599-2 E195 |                         |              |          | OK    | OK                    | OK            |
|                 | TUBO ESTR A500-B           |                         |              |          | OK    | OK                    | OK            |
|                 | TUBO MEC VMEC 134AP        |                         |              |          |       | OK                    | OK            |
|                 | TUBO TREF. ST52            |                         |              |          |       |                       |               |
|                 | TUBO A53-B                 |                         |              |          |       |                       |               |
|                 | TUBO AL 6063T6             |                         |              |          |       |                       |               |
|                 | TUBO SAE 1020/26           |                         |              |          |       | OK                    |               |
| BARRAS          | BARRA 4140                 | DIN 42CrMo4 - 1.7225    |              |          |       |                       |               |
|                 | BARRA 8620                 | DIN 21NiCrMo2 - 1.6523  |              |          |       |                       |               |
|                 | BARRA 8640                 | DIN 40NiCrMo22 - 1.6546 |              |          |       |                       |               |
| METAL DE ADIÇÃO | ER70-S                     | SG1-JMPMPM              |              |          |       |                       |               |
|                 | ER80-S                     | SG1-JMPMPM              |              |          |       |                       |               |
|                 | ER90-S                     | SG1-JMPMPM              |              |          |       |                       |               |
|                 | ER110-S                    | SG1-JMPMPM              |              |          |       |                       |               |
|                 | ER 308L                    |                         |              |          |       |                       |               |

Fonte: Autor, 2021

A imagem da figura 13 exemplifica como é efetuado o cadastro. No exemplo é utilizado uma matéria prima da empresa SSAB, onde pega-se no certificado de qualidade os testes informando a tensão plástica, propriedade térmica e composição química e adiciona-se no *Simufact Welding* para deixar calibrado para a simulação.

Figura 13 - Cadastro tensão plástica, propriedade térmica e composição química



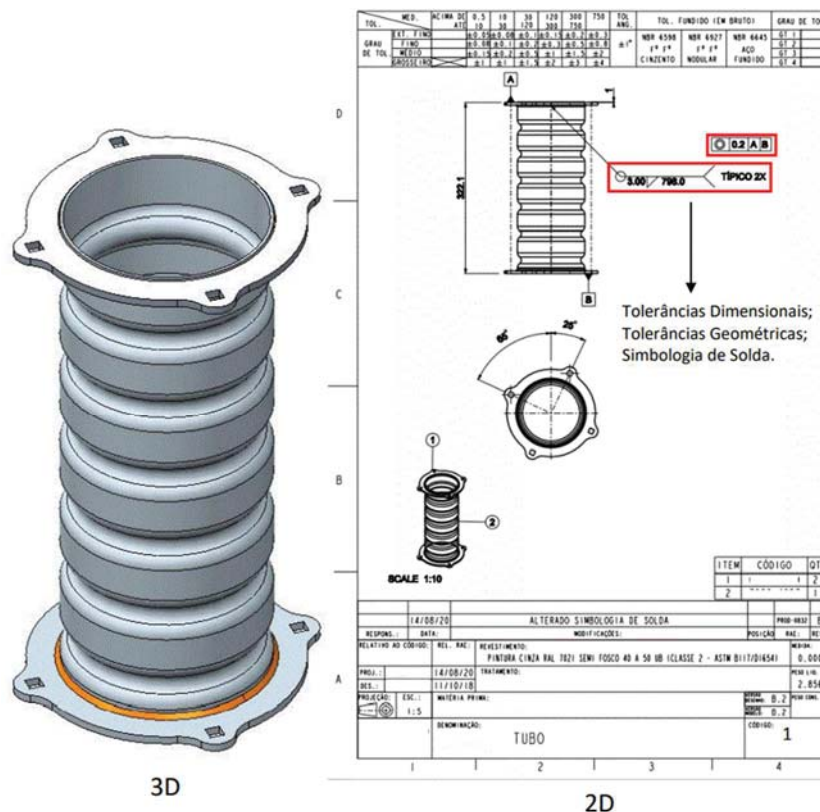
Fonte: Autor, 2021

## 1.5 Análise piloto

Para o lote piloto, foi escolhido uma peça que estava tendo problemas dimensionais. Após a soldagem a mesma estava empenando e saindo das tolerâncias dimensionais e assim causando retrabalhos e muitas vezes inutilizando o conjunto soldado. Efetuada todas as calibrações e cadastros, juntou-se todas as informações necessárias (parâmetros de soldagem, calibração do tipo de junta, IPS, sequenciamento, dispositivo de solda) e começou a análise.

A figura 14 mostra a peça simulada (TUBO) com as especificações, componentes, dimensões, tolerâncias e indicação do caminho que deverá ser percorrido para ser feito os cordões de solda.

Figura 14 - Peça 1 - Tubo



Fonte: Autor, 2021

Os desenhos foram gerados no software *CREO* e exportados para o *MSC APEX* para gerar a malha e fazer o refinamento dela nos pontos críticos, adicionado as propriedades do material conforme mostrado na tabela 3. Em sequência é feita a análise de bancada do processo dessa peça, verificando a tendência de deformação durante o processo sem qualquer auxílio de dispositivo de fixação.

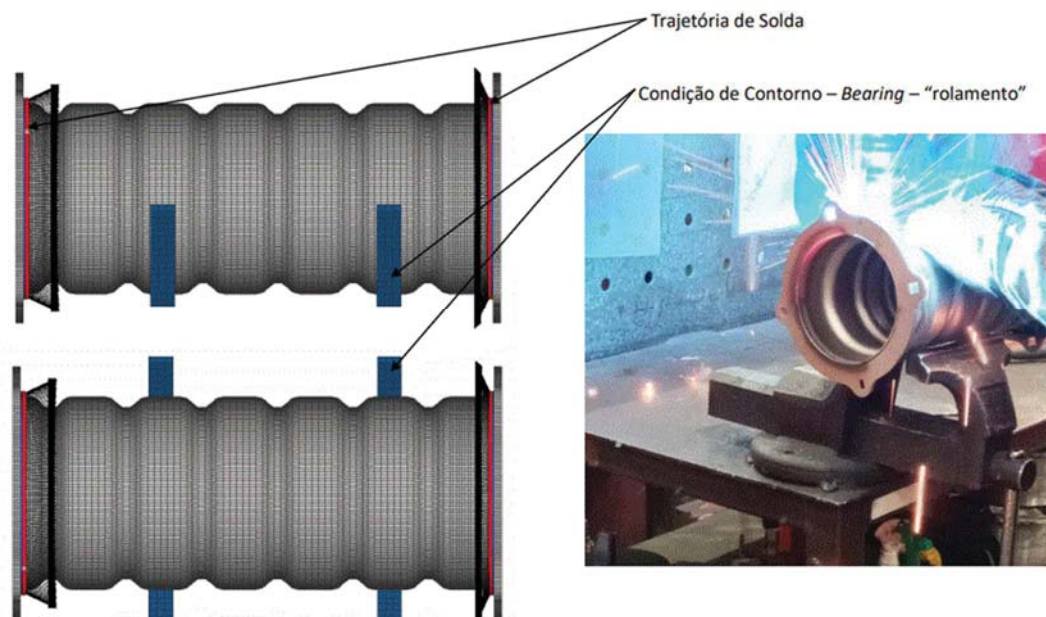
Tabela 3 - Propriedades Material e Especificação malha

| Propriedades              | AÇO AISI 304 INOX | MALHA HEXAÉDRICA SÓLIDA |           |
|---------------------------|-------------------|-------------------------|-----------|
| Densidade (kg/m³)         | 7850              | Tamanho                 | 2,00/5,00 |
| Módulo Elasticidade (Gpa) | 200               | Nós                     | 86.304    |
| Lim. Escoamento (Mpa)     | 205               | Elementos               | 56.670    |
| Lim. Resistência (Mpa)    | 515               |                         |           |
| Alongamento (%)           | 40                |                         |           |
| Metal de Adição           | 308L              |                         |           |

Fonte: Autor, 2021

Foi efetuado o primeiro teste de bancada e observado conforme mostrado nas figuras 15, 16 e 17 a deformação do material no *Simufact Welding* e também com a peça do lote piloto, pode-se observar que os flanges tiveram um empenamento e alongaram as furações, dessa maneira fugindo das tolerâncias estabelecidas nos desenhos e impossibilitando a montagem correta da mesma no conjunto.

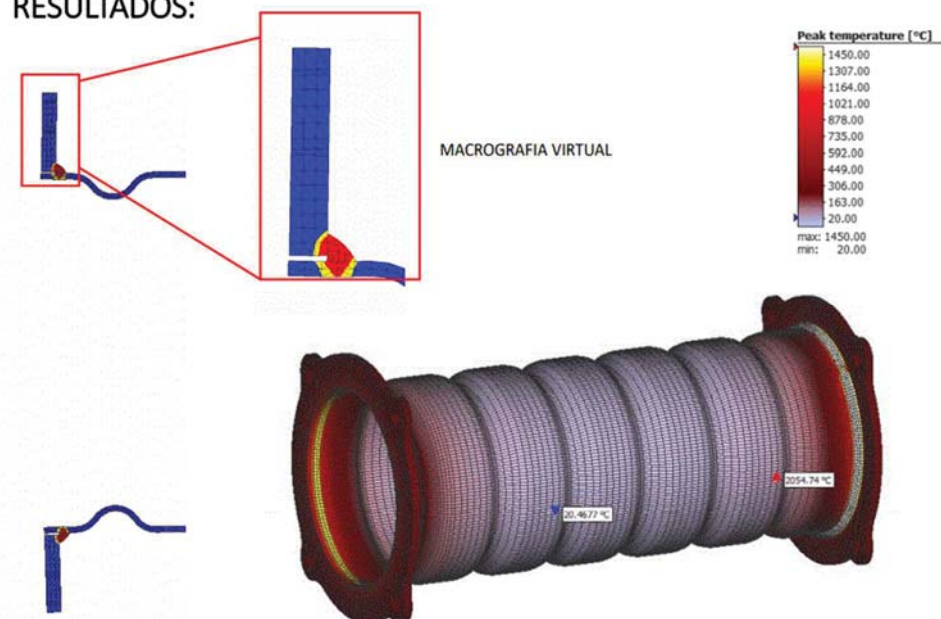
Figura 15 - Teste Simufact x Real



Fonte: Autor, 2021

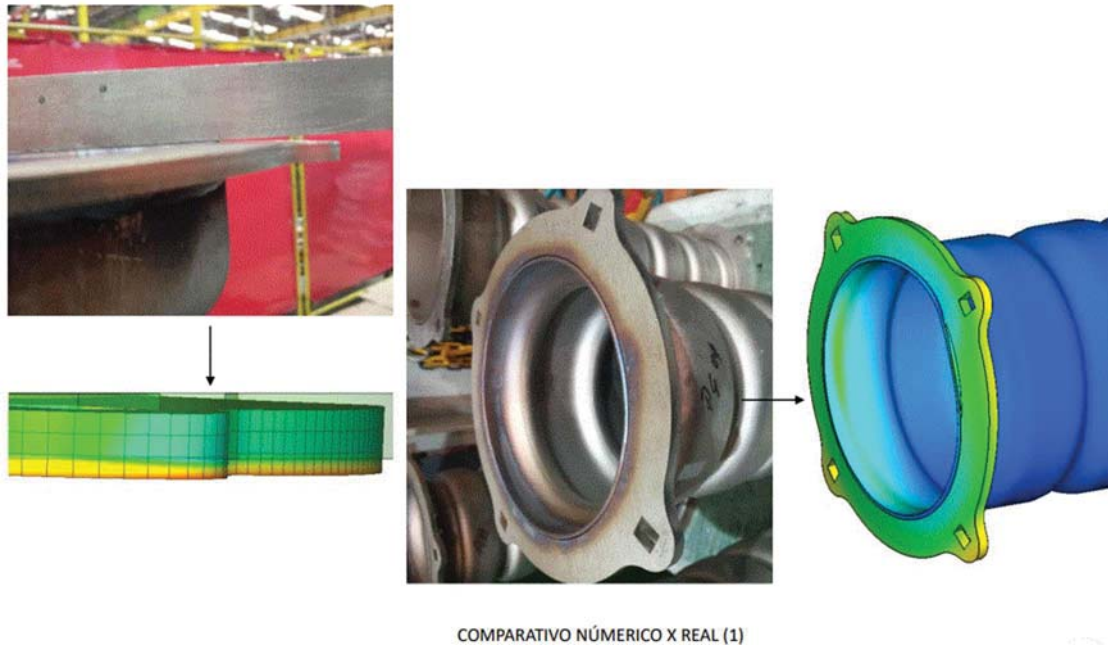
Figura 16 - Análise Simufact Welding

### RESULTADOS:



Fonte: Autor, 2021

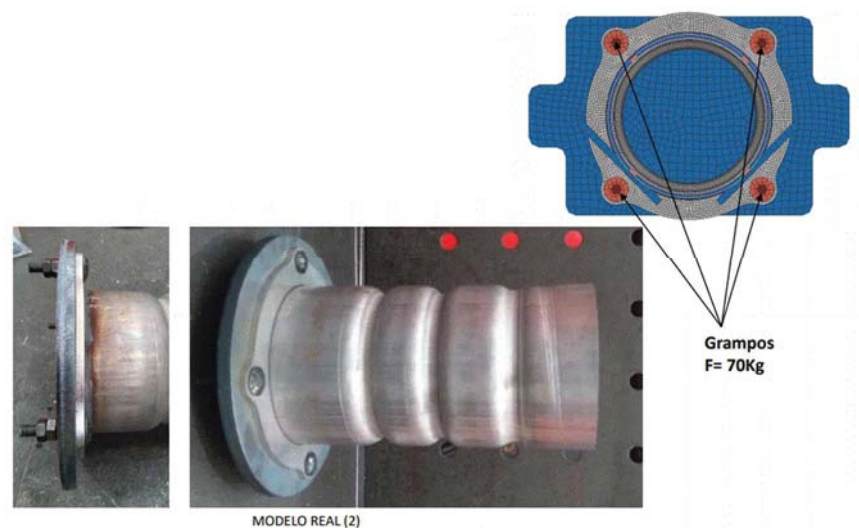
Figura 17 - Resultados Simufact Welding x Real



Fonte: Autor, 2021

Após finalizado o primeiro experimento foi analisado a tendência de deformação do material. Foi detectado a necessidade de um DSO (Dispositivo de soldagem) que consiga impedir esse empenamento como mostrado na figura 18. Para a simulação foi informada ao software *Simufact Welding* a força exercida pelos grampos conforme ilustrado na figura 18. Os valores das forças foram obtidos pelos grampos previamente calibrados, com isso garantindo o não empenamento do flange.

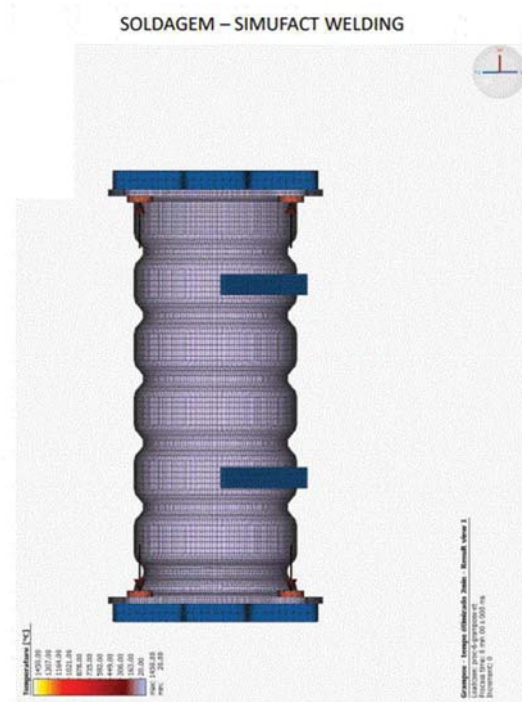
Figura 18 - DSO



Fonte: Autor, 2021

Com os novos parâmetros foi refeito o teste agora com a flange fixada conforme ilustrado na figura 18, o conjunto foi simulado e soldado, conforme mostra a figura 19.

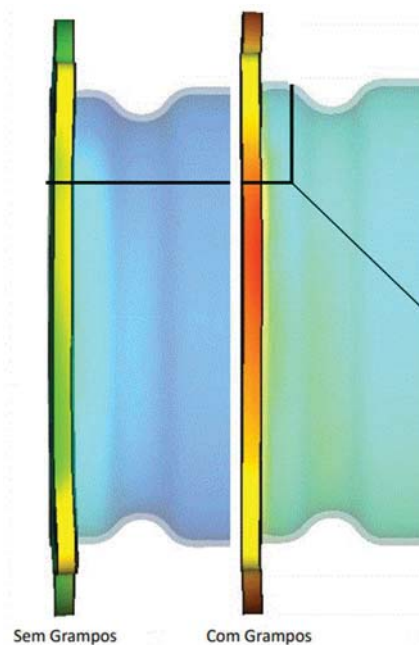
Figura 19 - Teste com DSO



Fonte: Autor, 2021

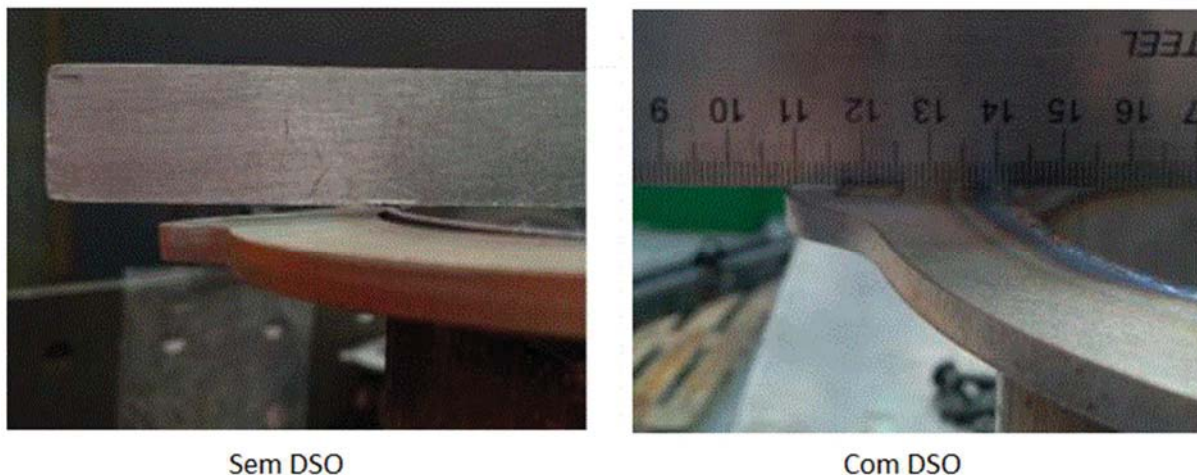
Foram comparados os resultados obtidos somente com a fixação na morsa e os resultados obtidos com o auxílio do dispositivo de fixação. A figura 20 mostra o resultado da simulação no *Simufact Welding* com e sem o DSO e a figura 21 mostra os resultados obtidos em bancada.

Figura 20 - Comparação Resultados Simufact Welding



Fonte: Autor, 2021

Figura 21 - Comparação Resultados Reais



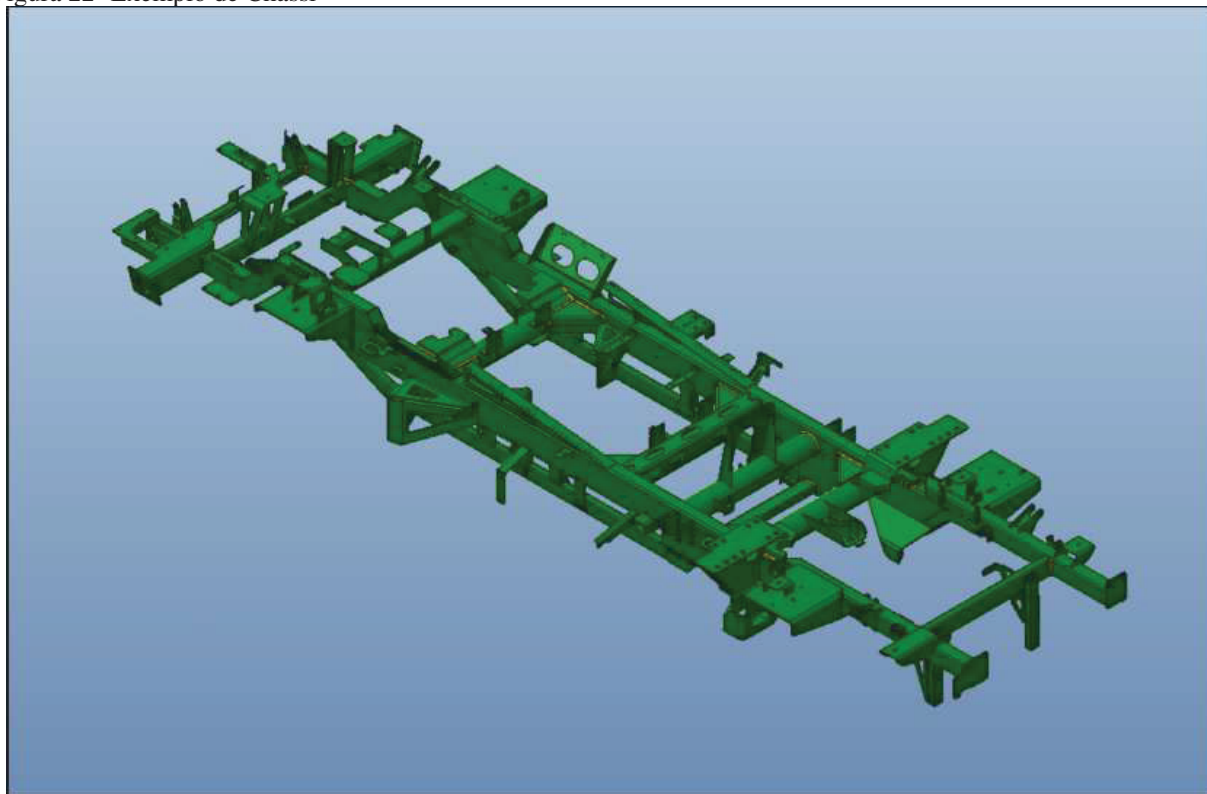
Fonte: Autor, 2021

Foi comprovado através do relatório dimensional realizado pelo CQ (controle de qualidade) que após a utilização do DSO, o paralelismo entre os planos das “orelhas” do flange ficou com um desvio médio de 0,13 mm, atendendo as solicitações técnicas, garantindo a qualidade do material e montagem do mesmo.

Esta etapa é iniciada pela definição de um conjunto soldado que já está em linha de produção em uma empresa de implementos agrícolas, visando uma melhoria de processo, seja em qualidade, ganho em produtividade, redução de processos ou de gastos. Hoje, com o mercado aquecido, nota-se uma grande falta de mão-de-obra qualificada em todos os segmentos, e na solda é o mesmo caso, dessa forma, pensou-se em conjuntos soldados com grandes cargas de solda, que utilizam grande carga horária para uaa produção.

Após uma análise feita dentro da empresa, constatou-se uma grande carga de trabalho utilizada nos chassis dos autopropelidos, dessa forma iniciou-se o estudo para evidenciar possíveis melhorias e após fazermos a simulação e comprovação do processo. A figura 22 ilustra um chassi como modelo.

Figura 22- Exemplo de Chassi



Fonte: Autor, 2021

Atualmente, esse chassi é feito em três etapas: ponteamento, soldagem e limpeza do conjunto, conforme ilustra as imagens 23, 24 e 25.

Figura 23- Ponteamento



Fonte: Autor, 2021

Na imagem 23, é mostrado o chassi em seu dispositivo para o processo de pontear, ou seja, fazer os primeiros “pontos de solda” para juntar várias peças e conjuntos menores, dessa maneira, fazendo uma fixação para prosseguir ao outro processo.

Figura 24 - Soldagem



Fonte: Autor, 2021

A imagem 24, mostra o conjunto soldado em um dispositivo de giro, permitindo acessibilidade para realização dos cordões de solda que não eram possíveis no primeiro DSO (figura 23).

Figura 25 – Limpeza e conferência

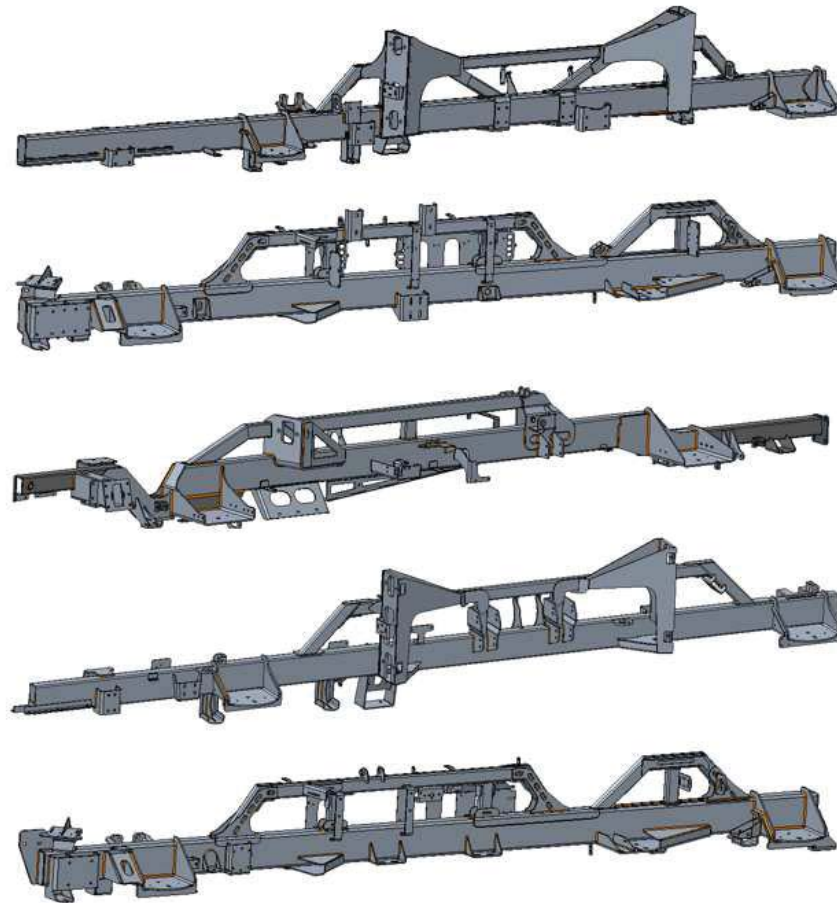


Fonte: Autor, 2021

A peça soldada segue para o último dispositivo onde é realizado a limpeza. Nessa etapa são removidos os respingos causados no processo de solda e ao mesmo tempo possibilita a verificação da solda e do conjunto soldado pelo controle de qualidade, garantindo assim, que o conjunto está de acordo com as especificações e pode seguir para a próxima etapa.

Com a grande demanda nos últimos tempos, exigindo cada vez mais máquinas com tecnologia e qualidade, foi investido em diversos robôs para produzir conjuntos de linha. Surgiu a ideia de “repartir” o chassi em duas longarinas.

Figura 26 - Modelos de longarinas



Fonte: Autor, 2021

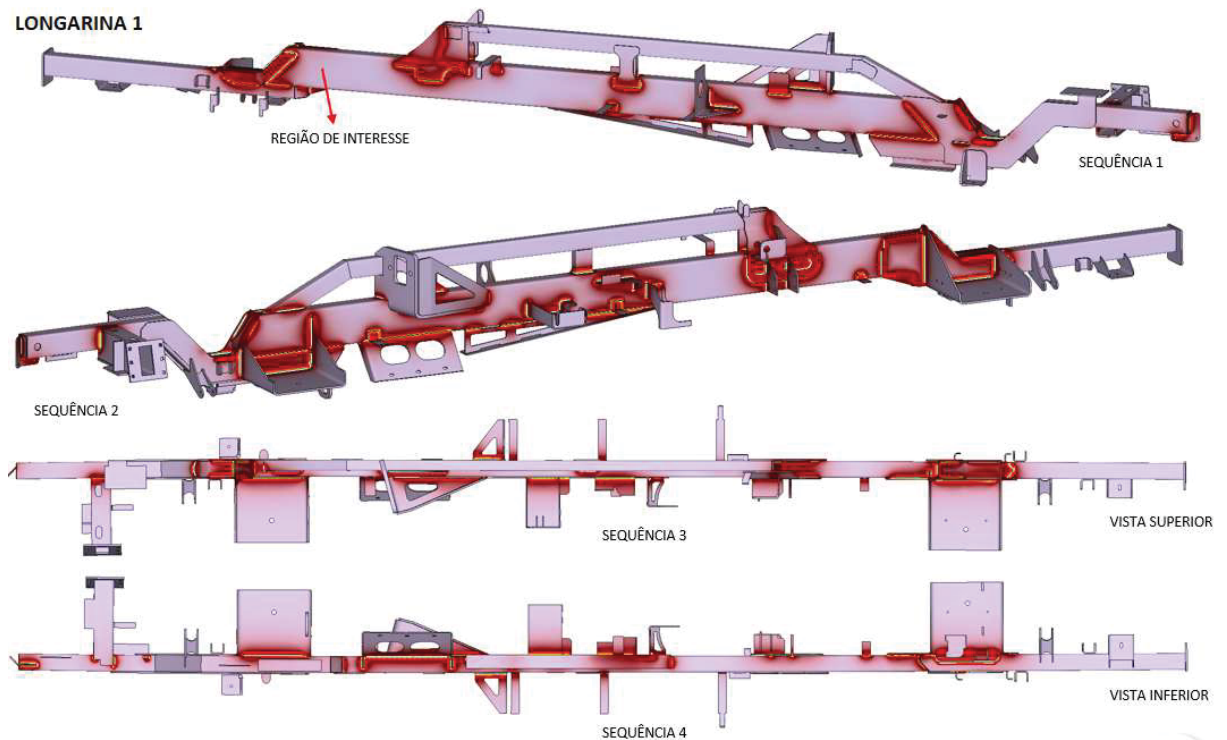
A figura 26 ilustra os projetos das longarinas dos diversos chassis dos autopropelidos, com a intenção de fazer a simulação nos conjuntos e levar os mesmos para serem soldados nos robôs de solda.

Começou-se as primeiras simulações nos conjuntos para verificar, num primeiro momento, qual a tendência de deformação do conjunto e quais os problemas que seriam encontrados.

Após a simulação via software e efetuado o teste do lote piloto como apresentado em TFGI, escolheu-se dentro de todos os modelos de longarinas mostrados na figura 26, a longarina 1, mostrado na figura 27.

Figura 27- Longarina 1

MODELO ANALISADO  
LONGARINA 1

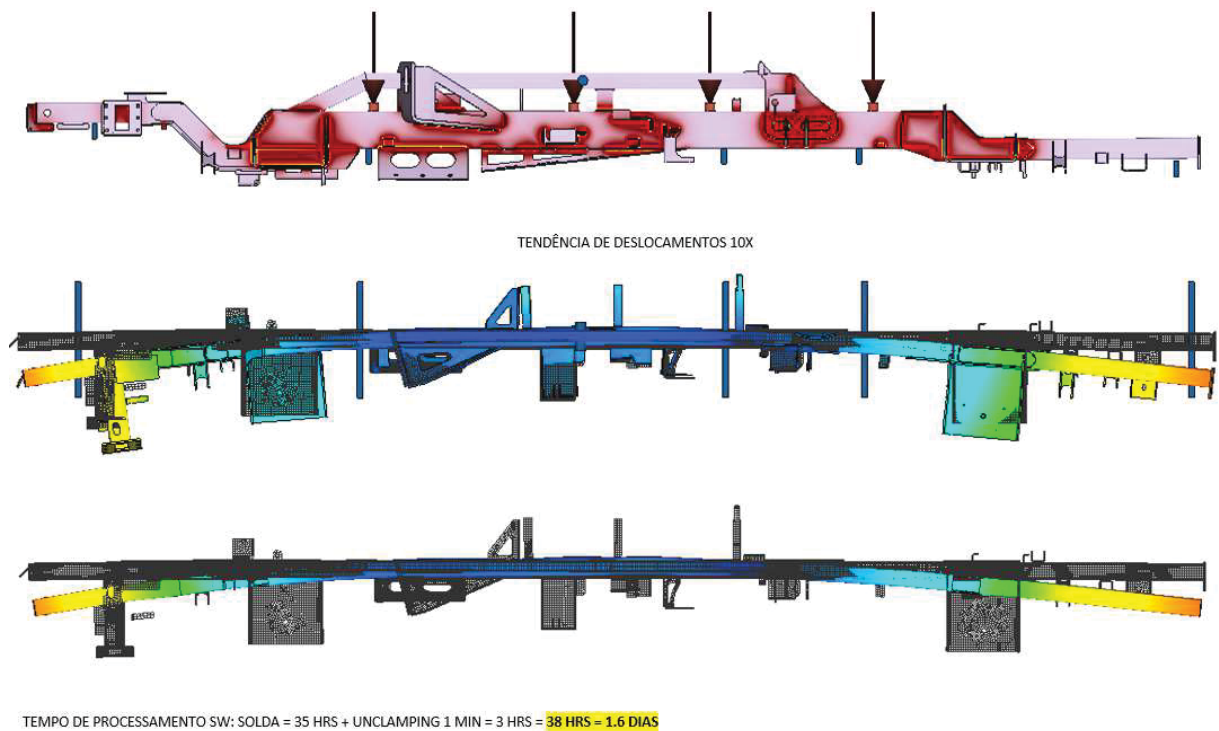


Fonte: Autor, 2021

Na figura 27 a longarina 1 é apresentada com destaque aos cordões de solda previstos e as respectivas áreas onde espera temperaturas altas, que podem causar descontinuidades dimensionais no conjunto soldado que compõem o chassi do auto-propelido.

A análise dos resultados da simulação, veja figura 28, mostra as áreas afetadas pela temperatura e as possíveis deformações causadas por ela. Para melhor identificação das distorções elas foram apresentadas com aumento de 10 vezes.

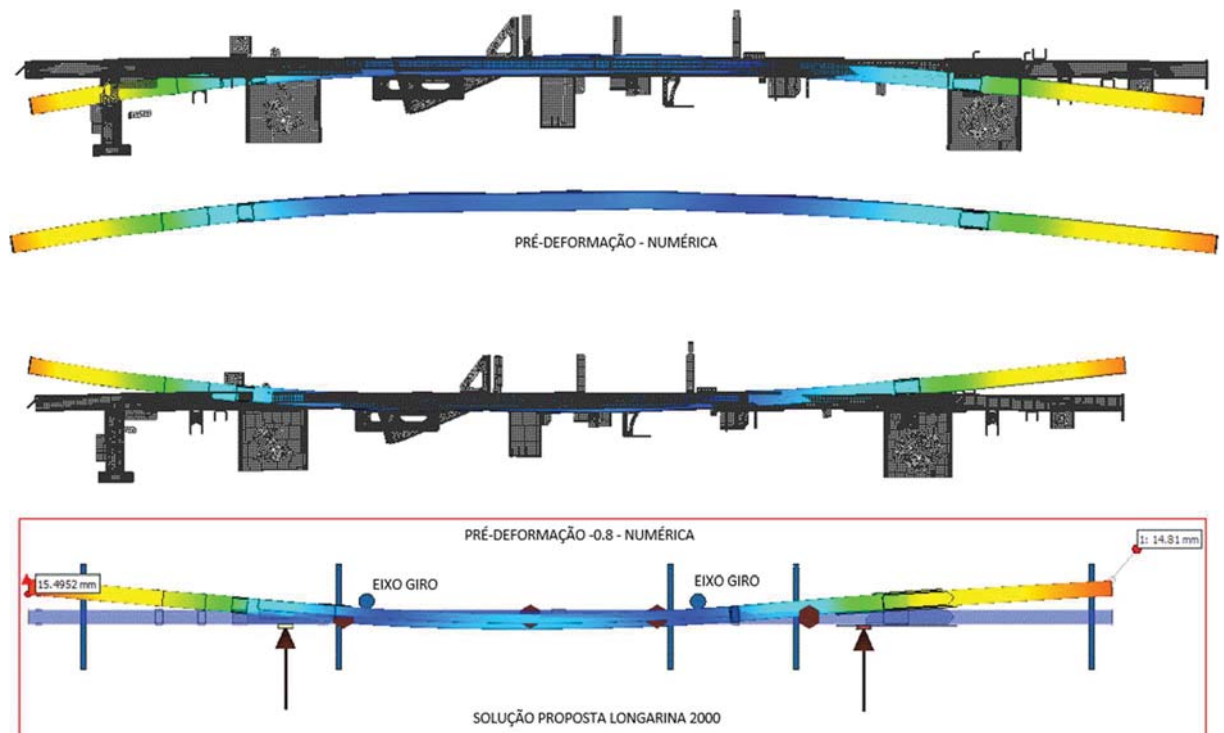
Figura 28 - Distorções Longarina 1  
RESULTADOS DISTORÇÕES  
LONGARINA 1



Fonte: Autor, 2021

Observa-se, ainda na figura 28, que as distorções são maiores nas extremidades da longarina, e que esse empenamento ocorre na mesma direção. O empenamento produz uma desconformidade dimensional do conjunto que prejudica o processo de montagem.

Figura 29- Solução proposta para as distorções

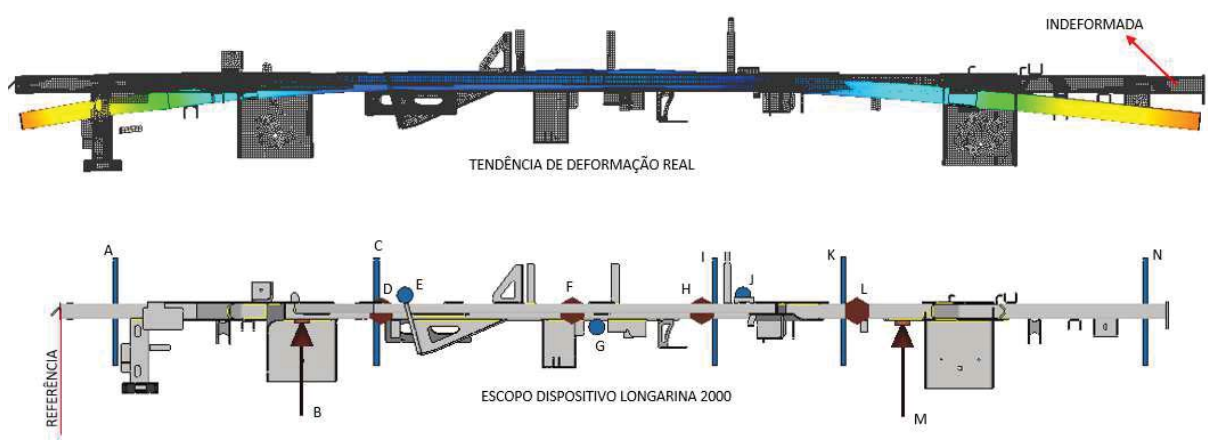


Fonte: Autor, 2021

Foi estudado como uma possível solução, fazer uma pré-deformação no conjunto da

longarina 1, para que o mesmo, após a soldagem, estivesse dentro das tolerâncias admissíveis do projeto. A figura 29, ilustra a pré-deformação calculada e simulada, informando os pontos que deverá ser aplicado uma força para a deformação do conjunto antes do processo de soldagem.

Figura 30 - Escopo para dispositivo



Fonte: Autor, 2021

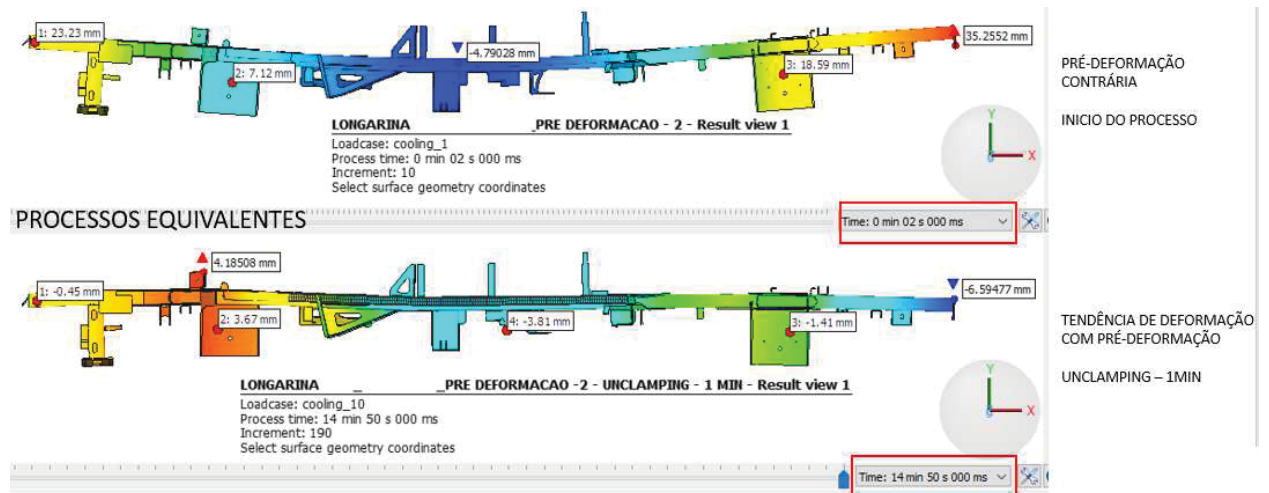
Tabela 4 – Legenda figura 30

| COTA | DIMENSÃO (mm) | ITEM      | FORÇA |
|------|---------------|-----------|-------|
| A    | 255           | MESA      | -     |
| B    | 1220          | CIL. 1    | 2000  |
| C    | 1595          | MESA      | -     |
| D    | 1620          | GRAMPO    | 440   |
| E    | 1740          | PINO GIRC | 2000  |
| F    | 2580          | GRAMPO    | 440   |
| G    | 2705          | PINO GIRC | 2000  |
| H    | 3235          | GRAMPO    | 440   |
| I    | 3300          | MESA      | -     |
| J    | 3440          | PINO GIRC | 2000  |
| K    | 3950          | MESA      | -     |
| L    | 4015          | GRAMPO    | 440   |
| M    | 4245          | CIL. 2    | 1600  |
| N    | 5470          | MESA      | -     |

Fonte: Autor, 2021

Foi calculado os valores que devem ser aplicados nos pontos informados na figura 30 e colocado na tabela 5, onde gera-se a pré-deformação do conjunto. Após essa aplicação, segue a figura 31, onde a longarina 1 está simulada com a pré-deformação feita e seus resultados obtidos.

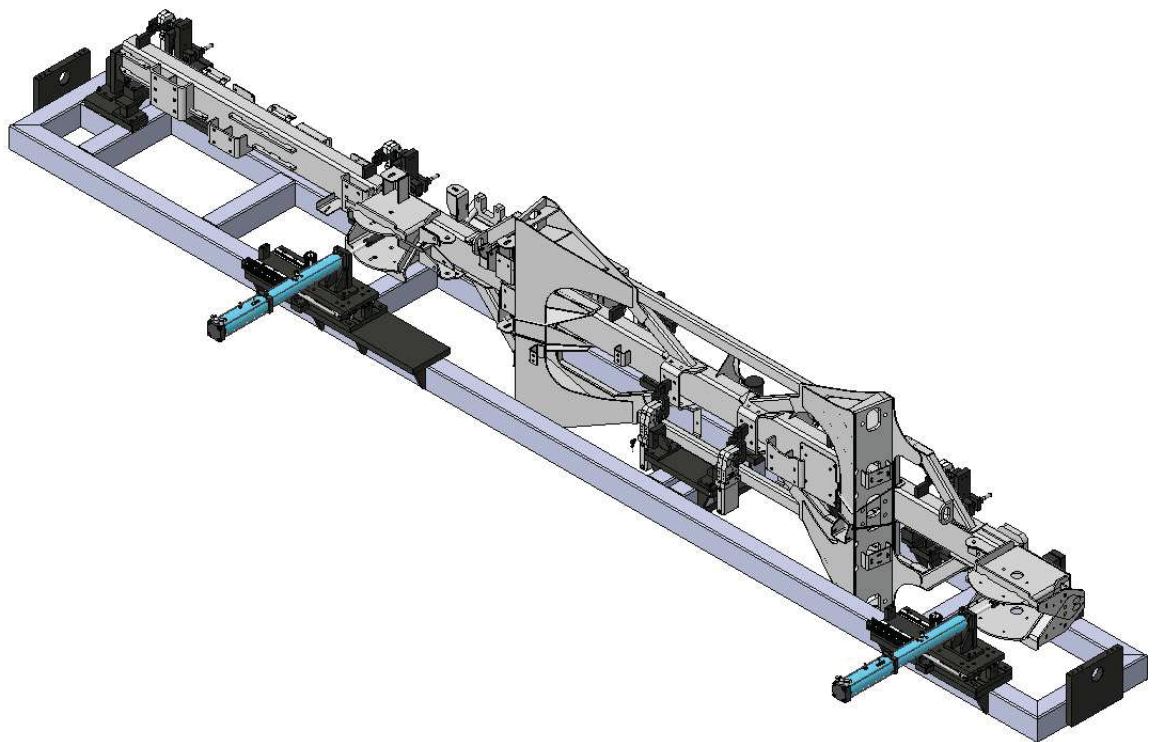
Figura 31 - Longarina 1 com pré-deformação simulada



Fonte: Autor, 2021

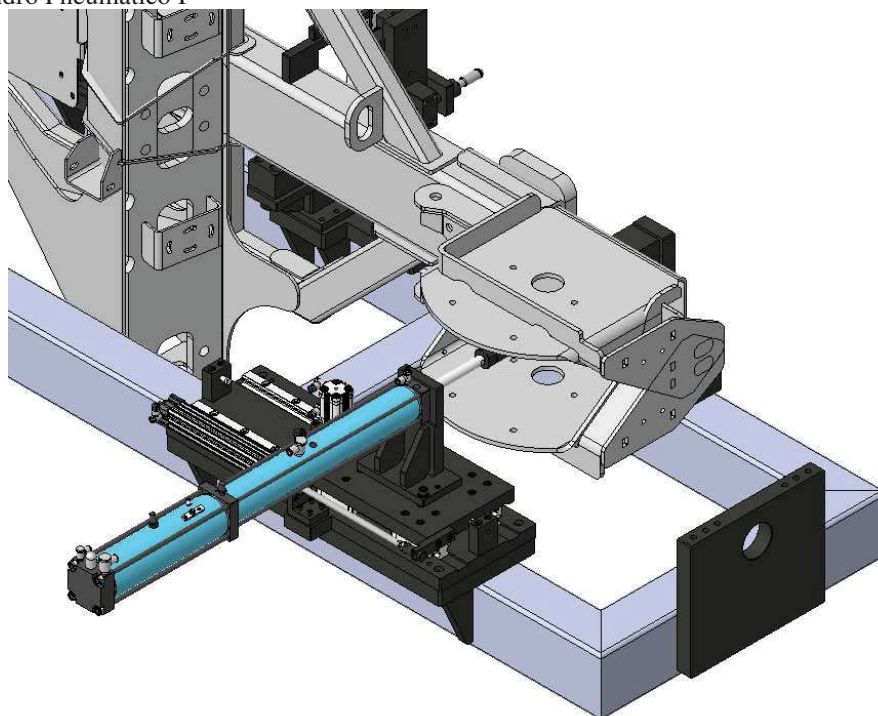
Após calculado e encontrado os valores e forças necessários para fazer a pré-deformação no conjunto, veja a tabela 4, esboçou-se o dispositivo para fazer a deformação antes da soldagem do conjunto conforme as figuras 32, 33 e 34.

Figura 32 - Dispositivo de pré-deformação



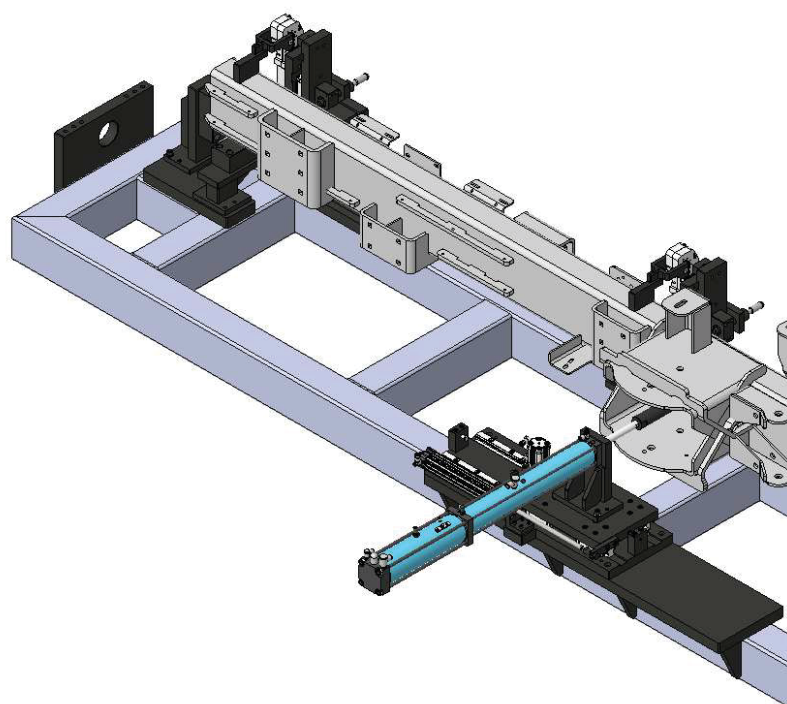
Fonte: Autor, 2021

Figura 33 - Cilindro Pneumático I



Fonte: Autor, 2021

Figura 34 - Cilindro Pneumático II



Fonte: Autor, 2021

## 4 RESULTADOS E DISCUSSÕES

Neste trabalho foi aplicado a técnica de simulação por elementos finitos para predição de deformações decorrentes do processo de soldagem. Os resultados obtidos mostraram-se positivos.

Este estudo objetivou a solução dos problemas decorrentes do processo de soldagem em equipamentos produzidos por uma indústria de implementos agrícolas. Esses problemas geravam retrabalhos e, em muitos casos, descarte de peças.

A utilização do *software* gerou também em um segundo momento um aumento de produção, pois foi implementado melhorias no processo de soldagem a partir da análise dos resultados das simulações dos conjuntos.

No modelo de peça conforme mostra a figura 14, obteve-se uma redução de 95% de retrabalhos e perdas nas peças após o uso do software de simulação. Esse dado foi obtido pela observação dos resultados de seis meses de utilização do software.

Outro resultado positivo obtido foi a eliminação de um feltro colocado entre os flanges, durante a montagem da peça, para permitir um ajuste correto. As melhorias no processo de soldagem e o consequente não empenamento, permitiu a redução de custos produzindo uma economia anual de R\$ 3491,29 conforme mostra na tabela 5.

Figura 35 - Exemplo de conjunto montado



Fonte: Autor, 2021

Tabela 5 – Estimativa da redução de custos

| REDUÇÃO DE CUSTO                           |                     |
|--------------------------------------------|---------------------|
| ESTIMATIVA PROD. ANUAL – 7981-2158 (UN)    | 578                 |
| QUANTIDADE FELTRO POR ITEM (UN)            | 2                   |
| ESTIMATIVA ANUAL – FELTRO (UN)             | 1.156               |
| CUSTO FELTRO / UN                          | R\$ 1,36            |
| <b>REDUÇÃO DE CUSTO ANUAL 7981-2158</b>    | <b>R\$ 1.572,16</b> |
| QUANTIDADE FELTRO NAS VARIAÇÕES ANUAL (UN) | 1.411               |
| <b>REDUÇÃO DE CUSTO ANUAL VARIAÇÕES</b>    | <b>R\$ 1.918,96</b> |
| <b>TOTAL REDUÇÃO ANUAL*</b>                | <b>R\$ 3.491,12</b> |

**\*REDUÇÃO ANUAL, DESCONSIDERANDO  
RETRABALHOS, TEMPOS...**

Fonte: Autor, 2021

Após os estudos e simulações, o processo de soldagem da longarina 1, figura 27, obteve-se uma redução de 1116 horas/ano nesse processo, em comparação com o tempo atual. Esse resultado, para uma única longarina, mostra o impacto desse estudo na produtividade do setor de soldas. A tabela 6 apresenta os resultados desse processo.

Tabela 6 – Estimativa da redução de custos

| TEMPOS : |             | Atual :     |          |     | QNT / ANO (considerando 2 longarinas por maquina) |
|----------|-------------|-------------|----------|-----|---------------------------------------------------|
|          | Longarina 1 | SOLDAR      | 02:33:00 | Hrs | 788                                               |
|          |             | Robô :      |          |     |                                                   |
|          |             | SOLDAR      | 01:08:00 | Hrs |                                                   |
|          |             | Diferença : | 01:25:00 | Hrs |                                                   |
|          |             | Diferença : | 85       | Min |                                                   |
|          |             | Ganhos :    | 66980    | Min |                                                   |
|          |             |             | 1116,333 | Hrs |                                                   |

Fonte: Autor, 2021

Conforme tabela 6, foi reduzido 1 hora e 25 minutos de cada longarina pelos principais motivos listados abaixo :

- Alteração do centro de custo, ou seja, era soldado manualmente, foi simulado com solda robô
- Novo sequenciamento de solda, por causa da alteração, levando assim o conjunto soldado para a soldagem automatizada.
- Novo DSO (Dispositivo de soldagem) para o conjunto soldado, dando mais acessibilidade e assim aumentando a velocidade de soldagem.

## 5. CONCLUSÕES

Este estudo mostrou que a simulação do processo de soldagem não só é necessário, porém é fundamental para melhoria da produtividade e a redução das perdas por retrabalho e descarte de peças mortas.

Partiu-se um conjunto soldado como lote piloto, figura 22 e tabela 4, e a esse conjunto aplicou-se as técnicas de simulação do processo de soldagem (figura 27). Os resultados obtidos provaram-se muito eficazes, resolvendo problemas e aumentando a produtividade.

As etapas de calibração dos resultados das simulações são necessários para que os resultados estejam em conformidade com os dados obtidos nas linhas de montagem. Essa etapa, deve-se ressaltar, é fundamental para que os resultados das simulações representem com fidelidade a realidade do processo de soldagem. Não se descarta a possibilidade de recalibração dos resultados periodicamente.

A proposta inicial era fazer a simulação do conjunto soldado “longarina 1” e criar o dispositivo de soldagem para comprovar os resultados obtidos na simulação, porém pela atual demanda de mercado e o curto tempo para concluir-se o trabalho TFGII, não foi possível.

Recomenda-se que mais estudos nessa área sejam realizados, pois isso melhorará não só a produtividade dentro da indústria, porém aumentará a cultura de simulação de processos de soldagem.

Recomenda-se também que estudos futuros venham a incorporar técnicas de inteligência artificial (IA) na melhoria dos processos de fabricação, em particular no processo de soldagem que o foco principal do trabalho.

## REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

CONAB. **Companhia Nacional de Abastecimento**. Disponível em: <<https://www.conab.gov.br/>>. Acesso em: 30 ago. 2018.

ESAB. **Processo de Soldagem: Eletrodo Revestido (MMA/ SMAW)**. Disponível em: <[https://www.esab.com.br/br/pt/education/blog/processo\\_soldagem\\_eletrodo\\_revestido\\_mma\\_smaw.cfm](https://www.esab.com.br/br/pt/education/blog/processo_soldagem_eletrodo_revestido_mma_smaw.cfm)>.

ESAB. **Apostila de Soldagem MIG-MAG**. São Paulo: Essa 2005.

INFO SOLDA. **Processo mig/mag – características – Infosolda**. Disponível em: <https://infosolda.com.br/biblioteca-digital/livros-senai/processos/173-processo-mig-mag-caracteristicas>. Acesso em: 15 maio 2021.

LUCA, R. de. **Descontinuidades na soldagem**. n. d, p. 18, 2014

SOUZA, R. M. **O Método dos Elementos Finitos Aplicado ao Problema de Condução de Calor**. Ufpabr, p. 40, 2003. Disponível em: [http://www.ufpa.br/nicae/integrantes/remo\\_souza/TrabPublicados/Apostilas/ApostilaElementosFinitosNiCAE.pdf](http://www.ufpa.br/nicae/integrantes/remo_souza/TrabPublicados/Apostilas/ApostilaElementosFinitosNiCAE.pdf).

MODENESI, P. J.; MARQUES, P. V; SANTOS, D. B. **Metalurgia da Soldagem Metalurgia da Soldagem**, p. 47, 2001.ESAB. Apostila de Soldagem MIG-MAG. São Paulo: Essa 2005