

**INSTITUTO FEDERAL DE EDUCAÇÃO,
CIÊNCIA E TECNOLOGIA DO RIO GRANDE DO SUL
Campus Ibirubá**

ANNEMARIE HENKER

**TRABALHO DE CONCLUSÃO DE CURSO
A simulação numérica como forma de minimizar as distorções de soldagem
(GMAW) em componentes de máquinas agrícolas.**

Ibirubá

2023

Annemarie Henker

TRABALHO DE CONCLUSÃO DE CURSO

A simulação numérica como forma de minimizar as distorções de soldagem (GMAW)
em componentes de máquinas agrícolas

Trabalho de Conclusão de Curso submetido à Banca Examinadora designada pelo Curso de Engenharia Mecânica do Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia, Campus Ibirubá, como requisito parcial à obtenção do título de Bacharel em Engenharia Mecânica.

Área de concentração: Projeto, fabricação e automação industrial.

Orientador: Prof. Dr. Luciano Machado Cirino

Ibirubá

2023

Henker, Annemarie.

A simulação numérica como forma de minimizar as distorções de soldagem (GMAW) em componentes de máquinas agrícolas/Annemarie Henker; orientador, Luciano Machado Cirino, 2022.

Monografia (graduação) - Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia do Rio Grande do Sul, Campus Ibirubá, Curso de Graduação em Engenharia Mecânica, Ibirubá, 2022.

Inclui referências

1. Engenharia Mecânica. 2. Distorções de Soldagem. 3. Elementos Finitos. I Cirino, Luciano. II. Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia do Rio Grande do Sul, Campus Ibirubá. Curso de Graduação em Engenharia Mecânica.

A simulação numérica como forma de minimizar as distorções de soldagem (GMAW) em componentes de máquinas agrícolas.

Annemarie Henker

Trabalho de Conclusão de Curso submetido à Banca Examinadora designada pelo Curso de Engenharia Mecânica do Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia, Campus Ibirubá, como requisito parcial à obtenção do título de Bacharel em Engenharia Mecânica.

Ibirubá, 01 de fevereiro de 2023.

Banca Examinadora:

Prof. Dr. Luciano Machado Cirino
IFRS campus Ibirubá

Prof. Me. Giancarlo Stefani Schleder
Instituição: IFRS campus Ibirubá

Prof. Dr. Luis Fernando Nicolini
Instituição: IFRS campus Ibirubá

Dedicatória

Dedico este trabalho a minha avó, que infelizmente não se faz mais presente neste plano, e a minha mãe, por se colocar em segundo lugar em inúmeros momentos para priorizar os filhos.

AGRADECIMENTOS

Agradeço primeiramente, a todas forças superiores por me acompanharem durante os seis anos de graduação.

Agradeço, a minha avó, Leoni S. Henker, por todas orações nos exames que peguei durante a faculdade, sem dúvidas foram essências. E a minha mãe, Joice Adriane Henker, por todo esforço quanto ao quesito educação em minha educação.

Agradeço as empresas de quais fiz parte, seja estagiando ou trabalhando de forma efetiva, foram essenciais na formação pessoal e profissional.

Agradeço aos professores do IFRS – Campus Ibirubá, em especial ao Prof. Me. Vitor Hugo Machado da Silveira e ao Prof. Dr. Luciano Machado Cirino, pela amizade ao longo do curso e os conselhos de grande valia.

Por fim, agradeço aos amigos que fiz durante a graduação, no trabalho e cidades que morei durante estes seis anos.

*“I think I found my place
Can't you feel it growin' stronger?
Little conquerors
I'm learnin' to walk again
I believe I've waited long enough”
Foo Fighters – Walk*

RESUMO

O presente trabalho teve como objetivo apresentar um estudo de caso que envolveu um perfil de sustentação de um componente agrícola, tendo a simulação numérica como uma forma de minimizar as distorções de soldagem. Como metodologia utilizou-se as distorções que o processo de solda causa no mesmo, e o método dos Elementos Finitos (MEF), este representado pelo software Simufact Welding, como ferramenta de análise do componente perfil de sustentação. Após a análise de pré e pós processamento, a tendência de deformação dada pelo software serviu como base na construção do dispositivo de soldagem, com isso previu-se o comportamento do conjunto durante o processo real. Após a análise, fora feito o try-out do dispositivo e célula de soldagem, a qual se teve quatro amostras do perfil de sustentação soldadas, as quais serviram para validar o modelo virtual de análise. Os resultados da validação indicam que a simulação numérica de processo de solda é fundamental para o entendimento dos efeitos gerados pelo processo de solda, na confecção do dispositivo e na seleção de meios para fazer a pré-deformação, fabricando conjuntos dentro das tolerâncias de projeto.

Palavras chave: simulação, distorções, processo de soldagem, Elementos Finitos.

ABSTRACT

The objective of this work was to present a case study involving a support profile of an agricultural component, with numerical simulation as a way to minimize welding distortions. The methodology used was the distortions that the welding process causes and the Finite Element Method (FEM), represented by Simufact Welding software, as a tool for analyzing the support profile component. After dividing the analysis into pre and post processing, the deformation tendency given by the software served as a basis for building the welding device, thus predicting the behavior of the assembly during the real process. After the analysis, the device and welding cell were tried out. Four samples of the support profile were welded, which served to validate the virtual analysis model. The results of the validation indicate that the numerical simulation of the welding process is fundamental for the understanding of the effects generated by the welding process, in the manufacturing of the device, and in the selection of means to perform the pre-deformation, manufacturing assemblies within the design tolerances.

Keywords: simulation, distortions, welding process, finite elements.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1: Perfil de sustentação em destaque.....	14
Figura 2: Representação do processo GMAW, região do arco.....	15
Figura 3: Equação da energia térmica.....	17
Figura 4: Equação de energia de soldagem.	18
Figura 5: Eficiência de processos de soldagem.	19
Figura 6: Densidade de energia por processo de soldagem.	19
Figura 7: Regiões da solda GMAW.....	20
Figura 8: Esquema das três barras.	22
Figura 9: Comparativo de tensões, Três barras X solda de topo por fusão.	23
Figura 10: Tensões internas de uma junta soldada.	24
Figura 11: Principais tipos de distorções devido ao processo de soldagem.	25
Figura 12: Formas de minimizar as distorções de soldagem.	26
Figura 13: Modelo de chassi de um implemento agrícola.	30
Figura 14: Parametrização para soldagem.....	30
Figura 15: Célula Robótica para soldagem.....	32
Figura 16: Cilindro TOX, RZK.	32
Figura 17: Robô Panasonic TM-1800.....	33
Figura 18: Modelos de elementos de malha.	35
Figura 19: Interface Software MSC APEX.	36
Figura 20: Interface de malhas Apex.....	36
Figura 21: Detalhes da malha e sua qualidade.....	37
Figura 22: Condições de contorno utilizadas para simulação.....	38
Figura 23: Sequência de soldagem do perfil de sustentação.	38
Figura 24: Tendência de deformação.	40
Figura 25: Grandeza de deslocamentos em Y.	40
Figura 26: Tendência de deformação.	40
Figura 27: Novas condições de contorno.....	42
Figura 28: Novo modelo numérico com pré deformação.....	43
Figura 29: Modelo no seu estado inicial, sem pré-deformação.	43
Figura 30: Deslocamentos após pré-deformação.....	43

Figura 31: Tendências de deformação das amostras reais.	45
Figura 32: Dados da tendência de deformação virtual.	46
Figura 33: Comparação modelo real e virtual	47
Figura 34: Projeto do Dispositivo com o resultado da simulação.	47
Figura 35: Detalhes da composição do dispositivo.	48
Figura 36: Fluxograma exemplificando o processo.....	49
Figura 37: Fluxograma do novo processo com a inserção da célula robótica.	50

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO	12
1.1	JUSTIFICATIVA.....	13
1.2	OBJETIVOS	14
2	REFERENCIAL TEÓRICO	15
2.1	O APORTE TÉRMICO NO PROCESSO DE SOLDAGEM.....	16
2.1.1	Zonas termicamente afetadas pelo calor	20
2.2	AS DISTORÇÕES DE SOLDAGEM E SEUS EFETOS	21
2.2.1	Desenvolvimento de tensões residuais	21
2.2.2	Formas de minimizar as distorções de soldagem	24
2.3	MÉTODO DOS ELEMENTOS FINITOS	27
3	MATERIAIS E MÉTODOS	29
3.1	MATERIAIS	29
3.2	MÉTODOS	34
3.2.1	Pré-Processamento do item	35
3.2.2	Condições de contorno utilizadas	37
3.2.3	Análise da tendência de deformação	39
4	RESULTADOS E DISCUSSÃO	42
4.1.1	Validação do modelo (Virtual vs. Real)	44
4.1.2	Projeto do dispositivo de solda	47
4.1.3	Melhorias do processo	49
5	CONCLUSÕES E SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS	52
5.1	SUGESTÕES TRABALHO FUTUROS	52
	REFERÊNCIAS	54
	ANEXO	57

1 INTRODUÇÃO

Historicamente, o agronegócio contribui com cerca de 20% a 25% de toda a riqueza produzida no Brasil (Galera, 2021). Sendo assim, o setor metal mecânico voltado ao ramo agrícola vem buscando formas de otimizar e acelerar seus processos de produção, visando atender a demanda do mercado com rapidez e agilidade e qualidade.

Neste âmbito, empresas como a Stara S/A fabricante de componentes e implementos agrícolas com 62 anos de atuação no mercado brasileiro e internacional, tem um interesse particular em desenvolver ou inovar seus processos produtivos, dentre eles o de soldagem, com a inserção de células robotizadas de soldagem e de softwares de simulação de processo, como o *Simufact Welding*, com a intenção de diminuir os problemas de distorções e de tensões residuais causadas pela soldagem e para melhor atender o cliente e garantir a qualidade de seus implementos.

Atualmente, a soldagem tem uma grande importância na indústria, não só pela intensa utilização como método de união permanente de metais, mas também devido ao fato de que, quando um conjunto mecânico chega ao setor de soldagem, esta já agregou grande valor em processos anteriores (corte, furação, dobramento, tratamento superficial etc.) (Edgar e Mazeo, 1993). Ou seja, uma peça soldada de forma errada ou com distorções, incorrerá em custos e retrabalho em diversos setores, quando não em perda total.

Dessa forma, a introdução da tecnologia CAE (Engenharia Assistida por Computador) em processos de manufatura se faz importante para minimizar um dos maiores problemas encontradas na indústria de implementos agrícolas em geral, entre elas, as distorções de soldagem e otimizar o processo, como por exemplo, o suporte ao desenvolvimento de dispositivos de solda (DSO) de peças com um grau de complexidade elevado, que é o caso que se trata no presente trabalho. Mais especificamente, este trabalho se desenvolveu como um estudo de caso realizado na empresa Stara S/A na qual se analisou um perfil de sustentação, subcomponente de um chassi agrícola.

Onde previu-se suas distorções e baseou-se o desenvolvimento de seu dispositivo e sequenciamento de soldagem por intenção da simulação numérica, para garantir a qualidade e entrega em um menor tempo possível da peça pronta.

1.1 JUSTIFICATIVA

A distorção ocasionada pelo processo de soldagem é uma grande preocupação na fabricação de implementos agrícolas. Seus efeitos, muitas vezes fazem com que o conjunto a ser soldado fique fora das tolerâncias de projeto. Tentativas e erros, retrabalhos, tempos elevados tempos de testes, custos excessivos e dependência de profissionais com experiência são situações frequentes desse processo de manufatura.

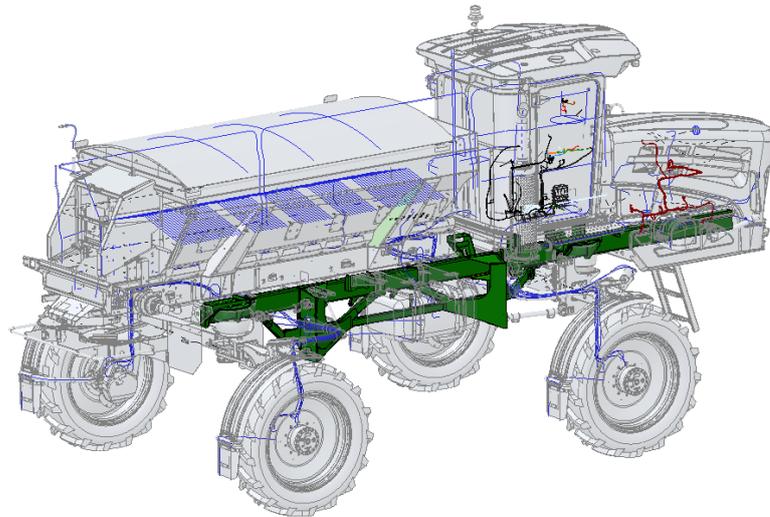
Formas de mitigar distorções de soldagem são comumente utilizadas para tentar garantir o dimensional dos conjuntos soldados. A tecnologia CAE, baseado no método dos Elementos Finitos, desempenha um papel importante na previsão das distorções do conjunto, em ambiente virtual, em todo o tempo do procedimento de soldagem. Este método consiste basicamente em simular o procedimento de soldagem em um modelo da peça de trabalho, simulação esta que pode demorar até mesmo dias. Depois de encerrada a simulação, seus resultados geram subsídios para tomada de decisão sobre projeto de dispositivos de solda (gabaritos) e sobre o processo adequado de soldagem (especialmente, soldagens automatizadas).

Entender como as distorções se dão nos processos de soldagem, como se formam as tensões residuais e como usar as tecnologias de modelagem e simulação de soldagem são fundamentais para mitigar os efeitos, especialmente no que confere a soldagem de implementos agrícolas em escala industrial.

A distorção induzida pela soldagem a arco no componente, perfil de sustentação, exposto na Figura 1, em questão foi modelada e simulada pelo software *Simufact Welding*. Com esse recurso computacional é possível entender o comportamento do modelo durante o processo, sendo um grande aliado na tomada de decisões, conforme já dito.

Os resultados da validação indicam que a simulação numérica de procedimento de soldagem é fundamental para o entendimento dos efeitos gerados pelo mesmo, na confecção do dispositivo e na seleção de meios para fazer a pré-deformação, fabricando conjuntos dentro das tolerâncias de projeto.

Figura 1: Perfil de sustentação em destaque



Fonte: Stara (2022).

1.2 OBJETIVOS

Este trabalho tem como objetivo geral realizar e apresentar a simulação numérica de um componente agrícola, em específico um perfil de sustentação, com um exemplo de métodos para prevenir e mitigar as distorções ocasionadas durante o procedimento de soldagem.

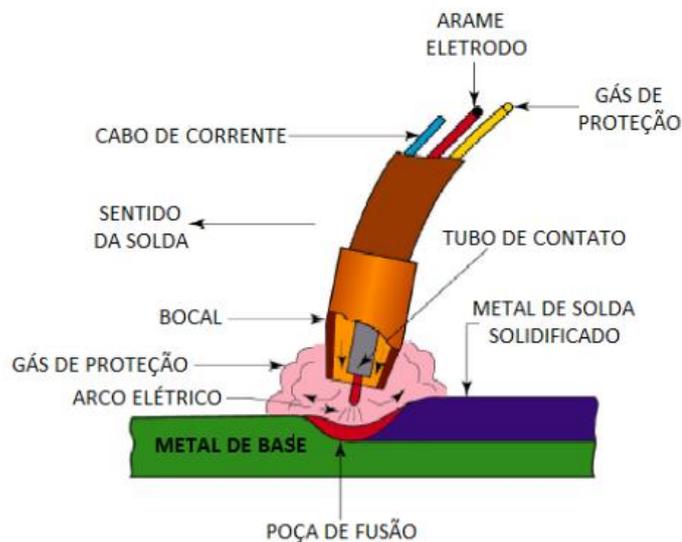
Já no que confere aos objetivos específicos:

- Entender o impacto das distorções geradas pelo processo de soldagem;
- Apresentar a utilização de simulação numérica aplicada ao processo de soldagem, em especial a pré-deformação do componente;
- Avaliar diferentes formas de minimizar distorções em componentes agrícolas;
- Comparar os resultados obtidos pela simulação com o resultado real de soldagem;
- Demonstrar a melhoria no setor de soldagem e montagem com a diminuição de peças não conformes.

2 REFERENCIAL TEÓRICO

A soldagem GMAW (Gás Ativo no metal) ou MIG/MAG, realiza a união de materiais metálicos pelo seu aquecimento e fusão localizados por meio de um arco elétrico estabelecido entre um eletrodo metálico não revestido e maciço na forma de fio e a peça de trabalho (metal de base). Os componentes deste processo são exemplificados na Figura 2.

Figura 2: Representação do processo GMAW, região do arco.



Fonte: Sumig (2018).

O termo MIG é uma sigla para *Metal Inert Gas* (Gás de proteção, ou mistura, inerte) e MAG para *Metal Active Gas* (mistura de um ou mais gases ativos com gases inertes ou o CO₂ puro). Segundo Scotti e Ponomarev (2008), o gás de proteção utilizado tem como função evitar contaminação do arame, das gotas de metal fundido em transferência e da poça de fusão pelos gases da atmosfera (O₂, N₂ e H₂O na forma de vapor). Além disso, este gás funciona como meio ionizante, proporcionando estabilidade ao arco, controlando a transferência metálica, consumo do eletrodo e fusão do metal base. A sigla adotada pela AWS - Sociedade Americana de Soldagem, para este processo é GMAW.

Destacam-se como vantagens da soldagem MIG/MAG:

- A alta capacidade de produção;
- Possibilidade de ser mecanizada ou automatizada;
- Grande versatilidade de materiais e espessuras aplicáveis;
- Ausência de operações de remoção de escória;
- Maior facilidade de uso.

Do ponto de vista metal mecânico, os efeitos mais críticos e temidos da soldagem são a fratura, distorção e flambagem (GOLDAK; AKHLAGHI, 2005). No caso das distorções térmicas, estas dependem muito das condições de contorno, sequência de soldagem, parâmetros de soldagem, como dados de entrada de energia, visto que o processo envolve a transformação de fase, em que há mudanças de microestrutura e, portanto, as propriedades mecânicas dos materiais podem diferir significativamente daquelas em temperatura ambiente. Compreender o comportamento termomecânico dos materiais e prever a distorção sob diferentes procedimentos de soldagem são dois pontos importantes para melhorar o processo de fabricação.

A fim de diminuir os efeitos das distorções de soldagem em conjuntos agrícolas surge, a análise de Elementos Finitos (MEF), voltada para o procedimento de soldagem. Ademais, por meio de simulações de soldagem, sob várias condições, projetos de processo de soldagem ideias são gerados na fabricação real.

O intuito deste referencial é apresentar as principais causas e aspectos relacionados a distorção, além de como as mesmas se formam e como preveni-las e evitá-las.

2.1 O APORTE TÉRMICO NO PROCESSO DE SOLDAGEM

Segundo Scotti (2008), os fatores que influenciam o calor efetivo na peça são: condutividade térmica, comprimento do arco elétrico, gás de proteção, energia de soldagem, formato da poça de fusão. Destaca-se ainda a espessura da peça que em conjunto com o coeficiente de condutividade térmica pode levar as seguintes situações:

- a) Perdas por convecção natural a temperatura baixa se o material tiver espessura suficiente de maneira que a superfície não seja aquecida significativamente para uma dada energia do arco.
- b) Para chapas finas, em que o lado contrário da chapa é aquecido até a temperatura de fusão, as perdas são por radiação e convecção da poça na raiz em alta temperatura, e perdas por convecção na raiz do cordão solidificado.
- c) Para chapas de espessura intermediária, ocorre a convecção natural em temperatura média. A consideração de diferentes mecanismos de resfriamento com a variação da espessura da chapa fortalece a ideia de que a energia perdida para o ambiente depende.

Embora as informações acima sejam, muito provavelmente, verdadeiras, Scotti (2008), não deixa claro exatamente o que são espessuras intermediárias por exemplo, o que acaba tornando as informações um pouco vagas.

O aporte de calor, ou energia de soldagem, conforme Rodrigues et al. (2007) é definido como a relação entre a potência que a fonte introduz (arco elétrico) na peça e a velocidade de deslocamento dela. Em outras palavras, é a quantidade de energia transferida à junta por unidade de comprimento.

Este aporte de calor pode ser alterado por meio da variação da alteração de valores de tensão do arco, corrente e velocidade de soldagem. Entretanto, para um mesmo processo de soldagem, essas variações são limitadas em função do diâmetro do consumível, do tipo de fonte (corrente constante ou tensão constante) e pelas características construtivas dos consumíveis.

O arco de soldagem transforma energia elétrica em energia térmica e transfere para a peça. Além do calor, o arco gera radiação eletromagnética de alta intensidade, nas faixas do infravermelho, visível e ultravioleta. A energia térmica gerada num arco elétrico pode ser calculada pela Equação 1, na figura 3 abaixo (MARQUES, MODENESI; BRACARENSE, 2005).

Figura 3: Equação da energia térmica.

$$Q = \Delta V \cdot I \cdot t \qquad \text{Equação (1)}$$

Fonte: Marques, Modenesi; Bracarense, 2005.

Onde:

- Q é a energia térmica gerada (J);
- ΔV é a queda de potencial no arco (V);
- I é a corrente elétrica no arco (A);
- t é o tempo de operação (s).

Marques, Modenesi e Bracarense (2009) abordam a energia de soldagem, também chamado aporte térmico, como “[...] a quantidade de energia fornecida à junta por unidade de comprimento da mesma”. De acordo com Wainer, Brandi e Mello (1992), parte da energia gerado pelo arco elétrico é dissipada por meio da radiação do calor e convecção dos gases de proteção, sendo necessário considerar uma eficiência térmica no processo de soldagem para expressar a quantidade de energia efetivamente utilizada na soldagem. A energia de soldagem é característica de cada processo de soldagem e é expressa conforme Equação 2, exemplificada na figura 4 (MARQUES, MODENESI & BRACARENSE, 2005).

Figura 4: Equação de energia de soldagem.

$$H = \eta \cdot \frac{V \times I}{v} \quad \text{Equação (2)}$$

Fonte: Marques, Modenesi; Bracarense, 2005.

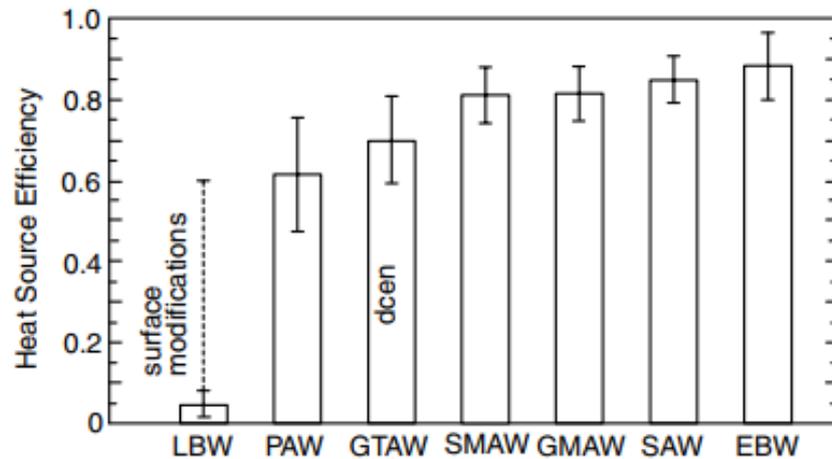
Onde:

- H é a energia de soldagem (J/mm);
- η é a eficiência térmica do processo;
- V é a tensão (V);
- I é a corrente (A);
- v é a velocidade de soldagem (mm/s).

Segundo Machado (2000) a eficiência térmica do processo GMAW varia de 65% a 85%. A figura 5 dá uma ideia razoável das eficiências térmicas para vários processos de soldagem incluindo o GMAW.

Figura 5: Eficiência de processos de soldagem.

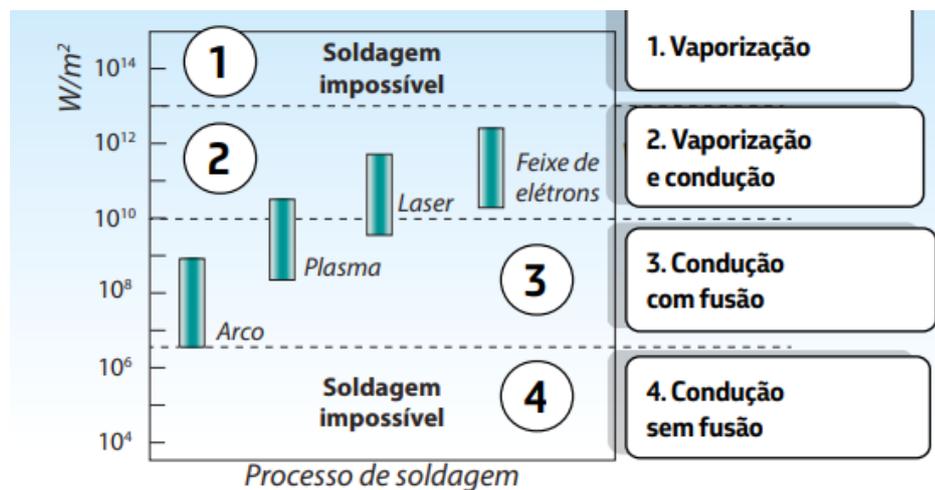
(Na figura: LBW – Solda a laser; PAW – Solda a plasma; GTAW - Soldagem a arco de tungstênio a gás (TIG); SMAW – Eletrodo revestido; GMAW – Solda MIG/MAG; SAW – Solda).



Fonte: Kou (2002).

Conforme Mansur et al. (2011), cada processo de soldagem apresenta uma densidade de energia, ou seja, uma quantidade de energia por área de aplicação, figura 6. Os processos de menor densidade de energia têm um menor rendimento térmico, o que faz com que se tenha uma maior dissipação de calor na peça aumentando, por exemplo, a extensão da ZAC (zona afetada pelo calor). E, conseqüentemente, os processos de maior densidade de energia concentram maior o calor na peça, aquecendo uma menor porção do material, melhorando a eficiência térmica da soldagem.

Figura 6: Densidade de energia por processo de soldagem.



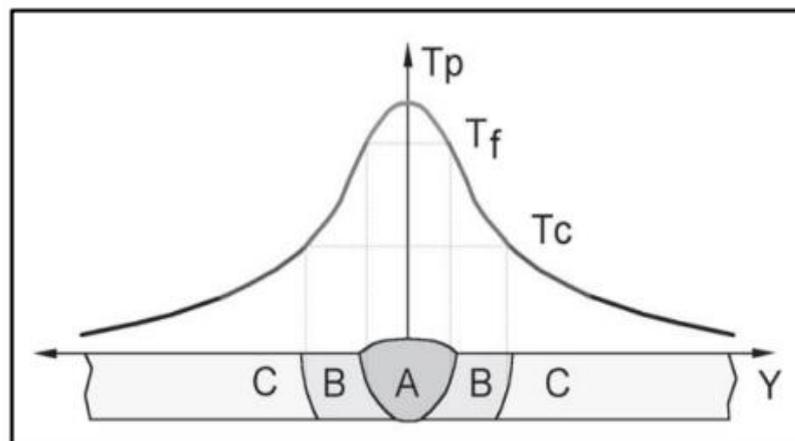
Fonte: MODENESI; BRACARENSE, (2012).

Depois do procedimento de soldagem realizado acontece a segunda etapa que é a dissipação desse calor, que ocorre principalmente por condução para o restante da peça.

2.1.1 Zonas termicamente afetadas pelo calor

Conforme Marques, Modenesi e Bracarense (2005), uma junta soldada pode ser decomposta em 3 regiões distintas conforme mostra a figura 7. A região A representa a zona fundida, a região B é a zona termicamente afetada e a região C é o metal base. Como variáveis no gráfico: T_p (temperatura de pico), T_f (temperatura de fusão) e T_c (temperatura crítica).

Figura 7: Regiões da solda GMAW.



Fonte: Marques, Modenesi e Bracarense (2005).

Conforme Baccin (2021), a zona fundida (ZF) é a região onde o material fundiu e se solidificou durante a operação de soldagem. Neste caso há uma “mistura” do metal de adição (arame) com o metal de base que geralmente têm composições químicas diferentes, mas que devem ser compatíveis. As temperaturas obtidas nesta região são superiores à temperatura de fusão do metal base.

Já na zona termicamente afetada (ZTA), não ocorre a fundição do metal de base, pois, apesar da temperatura ser maior que a temperatura crítica (mudança de fase; de ferrita para austenita) do material, a temperatura de pico não atingiu a temperatura de fusão. Nessa região ocorre a alteração da microestrutura e das propriedades do metal de base devido ao ciclo térmico de soldagem. Esta alteração pode ser mais ou menos prejudicial em função do tipo de aço que será soldado. Aços com porcentagens de carbono acima de 0,25% ou com adição de elementos de liga são de menor soldabilidade,

geralmente exigindo alguns artifícios especiais como pré e pós-aquecimento, controle de temperatura interpasse ou mesmo tratamento de alívio de tensões em casos mais severos.

O metal de base é a região mais afastada do cordão de solda e, por isso, não é afetado pelo processo de soldagem. As suas temperaturas são inferiores às temperaturas críticas do material, Baccin (2021).

2.2 AS DISTORÇÕES DE SOLDAGEM E SEUS EFETOS

As distorções em juntas soldadas reduzem a precisão de montagem entre partes, agregam custos com retrabalhos, afetam a resistência e a aparência visual do produto final. Por ser fenômeno intrínseco ao processo de soldagem, deve-se desenvolver alternativas e soluções de forma que essas sejam minimizadas ainda no momento do projeto da junta soldada.

Conforme (Machado 2000), independentemente da sua origem, a energia utilizada para a soldagem provoca notáveis alterações nos metais base e de solda. Então, quando um fluxo térmico é estabelecido, este exerce profunda influência sobre o aço em pelo menos os seguintes aspectos da junta soldada:

- Macroestrutura de solidificação do metal de solda;
- Transformações microestruturais, crescimento dos grãos, transformações de fase, etc.;
- Propriedades mecânico/metalúrgicas;
- Descontinuidades;
- Tensões residuais;
- Deformações;

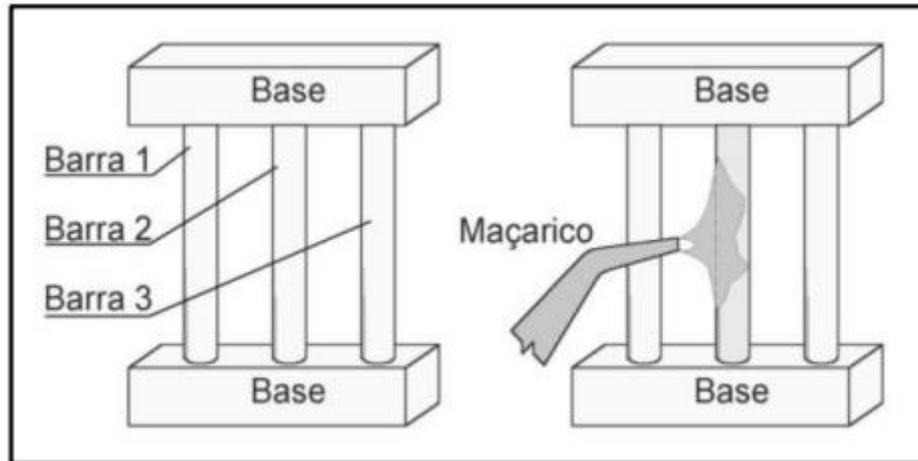
Destas influências, o que mais interessa no contexto deste trabalho são as tensões residuais e as deformações (distorções).

2.2.1 Desenvolvimento de tensões residuais

Kou (2002) e Marques, Modenesi e Bracarense (2005) explicam o desenvolvimento de tensões residuais considerando o aquecimento e resfriamento sob

restrição se valendo de um modelo, conhecido como Modelo das três barras. A figura 8 mostra três barras idênticas conectadas a dois blocos rígidos.

Figura 8: Esquema das três barras.



Fonte: Marques, Modenesi e Bracarense (2005).

As 3 barras, inicialmente, estão em temperatura ambiente e nenhuma está sob esforço mecânico (tensões internas nulas). Na etapa seguinte, a barra central é aquecida, porém sua expansão térmica é restringida pelos blocos rígidos e as barras laterais que não sofreram mudança de temperatura. Como consequência, tensões compressivas são produzidas na barra central, que tende a aumentar conforme a temperatura aumenta. A barra deforma-se elasticamente até que as tensões internas atinjam o limite de escoamento em compressão. O limite de escoamento representa o limite superior das tensões que um material suporta antes de começar a deformar plasticamente (deformação permanente).

Mantendo o aquecimento, a dilatação tende a continuar. Porém, como os níveis de tensões internas atingiram o limite de escoamento, a barra central começa a se deformar plasticamente. A deformação continua até que o aquecimento cesse. Quando o aquecimento acaba e a barra central esfria, sua contração térmica é contida pelas barras laterais.

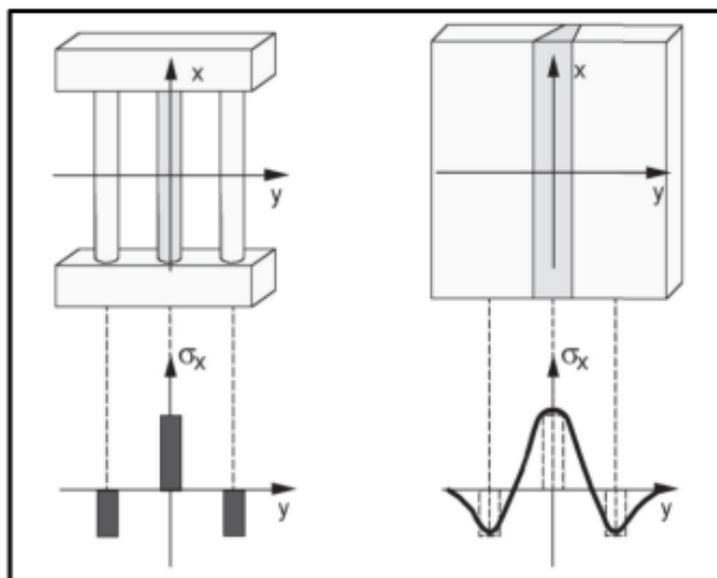
Com a diminuição da temperatura, o esforço de compressão sentido pela barra tende a diminuir, até se anular. A anulação ocorre numa temperatura superior à temperatura inicial, porém a temperatura continua a baixar e a barra quer continuar a diminuir de comprimento. Entretanto a contração é restringida pelas barras transversais e laterais. Consequentemente, as tensões compressivas na barra

central caem rapidamente e mudam para tensões de tração, que aumentam conforme a temperatura reduz, até que o limite de escoamento em tração seja alcançado.

A partir daí a barra começa a se deformar plasticamente em tração até a temperatura inicial ser atingida. Como resultado final, a barra central, que não tinha nenhum esforço interno no início, apresenta tensões residuais. Já as barras laterais, para manter o equilíbrio, ficam sujeitas a tensões de compressão iguais à metade da tensão de tração na barra central.

Na soldagem, o cordão de solda se comporta de forma similar à barra central e o metal de base de forma similar às barras laterais. A figura 9, mostra a distribuição de tensões residuais longitudinais (σ_x) numa junta soldada ao longo da direção transversal de uma solda de topo e compara à com o exemplo das três barras. A expansão e contração do cordão de solda e do metal de base próximo ao cordão são restringidas pelas áreas mais distantes. Como consequência, após o resfriamento até a temperatura ambiente, existem tensões residuais de tração no cordão de solda e no metal base próxima a ele. Já a área mais afastada apresenta tensões residuais de compressão. (KOU, 2002).

Figura 9: Comparativo de tensões, Três barras X solda de topo por fusão.

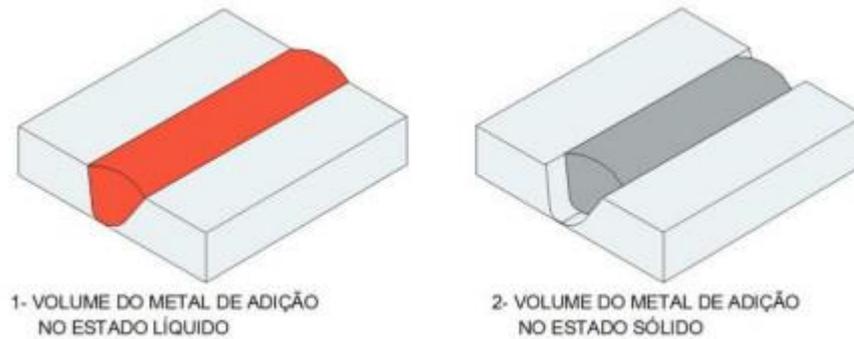


Fonte: Marques, Modenesi e Bracarense (2005).

Assim, conforme Machado (2021), uma forma de visualizar o desenvolvimento de tensões internas em uma junta soldada é mostrada na figura 10 abaixo. No instante em

que é depositado, o metal de adição está aquecido e no estado líquido, ocupando o volume mostrado em (1). Na temperatura ambiente, essa mesma quantidade de metal solidificado ocupa somente o volume mostrado em (2).

Figura 10: Tensões internas de uma junta soldada.



Fonte: Belém (2006).

As tensões que ocorrem na junta são devidas à expansão e contração do metal de solda que são restringidas pelas regiões mais distantes. Como consequência, após o resfriamento até a temperatura ambiente, tensões residuais de tração vão se formando no metal de solda e em regiões próximas.

Enquanto isso, nas regiões mais distantes ao metal de solda e adjacências desenvolvem tensões residuais de compressão o mecanismo que leva a esse resultado é análogo ao modelo de três barras. O resultado final são esforços de tração na região da solda e adjacências e tensões de compressão no metal de base.

2.2.2 Formas de minimizar as distorções de soldagem

A união de componentes pelo processo de soldagem gera inúmeros efeitos indesejáveis. Dentre eles, e as distorções causadas são consideradas como pontos críticos, quando se fala em indústria agrícola metal mecânica. As distorções ocorrem devido ao elevado ciclo térmico que estes componentes são submetidos, aquecimento e resfriamento rápidos que criam tensões residuais que deformam o material.

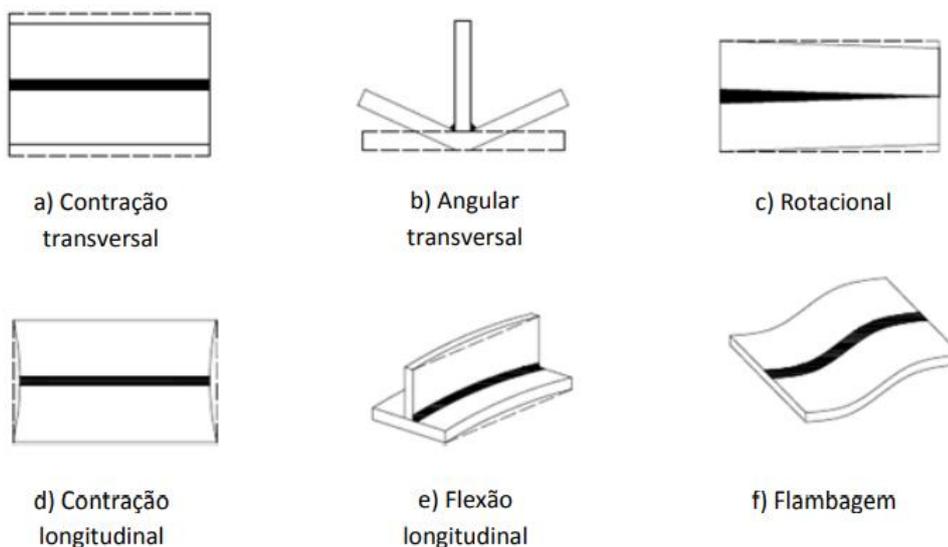
Segundo Deng et al. (2008) há duas principais causas de distorções em estruturas soldadas. A primeira é a contração em consequência do aquecimento e resfriamento rápido na região da solda, que pode ser dividida em três categorias: longitudinal, transversal e angular. Estas deformações são fortemente influenciadas pelo aporte

térmico, grau de restrição, geometria da penetração do cordão, espessura da chapa e tipo de junta. O segundo fator envolve problemas que podem ter origem na montagem do conjunto a ser soldado como desalinhamento, abertura de raiz, ou seja as frestas que ficam entre as peças a serem soldadas, fato que se dá o nome de GAP. A respeito do segundo fator, vale comentar que Deng et al. (2007) trataram de soldagem de tubulações, um assunto com características diversas do que normalmente se têm em soldagem de implementos agrícolas.

Na figura 11, Masubuchi (1980) classifica os principais tipos de distorção devidos ao processo de soldagem como:

- a) Contração transversal: contração perpendicular ao cordão de solda;
- b) Angular transversal: causado por uma distribuição de temperaturas não uniforme ao longo da espessura;
- c) Rotacional: causado pela distorção angular no plano da placa devido à expansão térmica;
- d) Contração longitudinal: na direção do cordão de solda;
- e) Flexão longitudinal: distorção ao longo do cordão de solda e perpendicular ao plano da solda;
- f) Flambagem: causado por tensões compressivas que ocasionam instabilidade em placas finas.

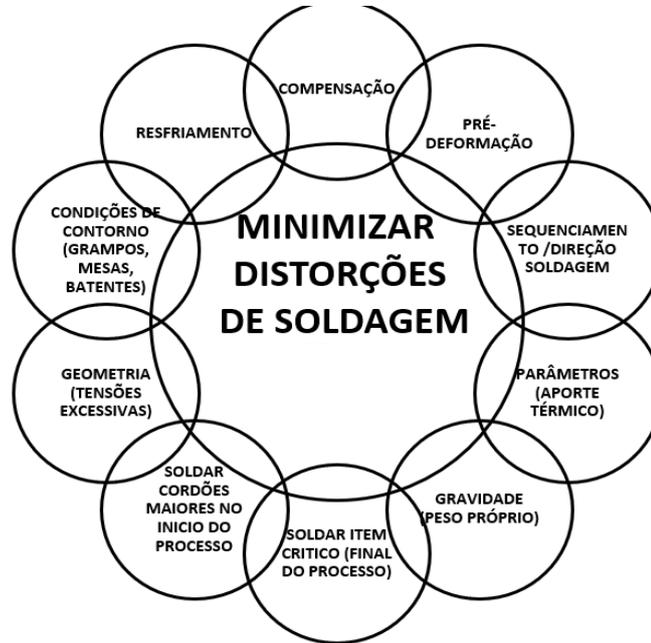
Figura 11: Principais tipos de distorções devido ao processo de soldagem.



Fonte: Masubuchi (1980).

Conhecer formas de minimizar essas distorções, é essencial para tomar decisões assertivas e garantir o conjunto fabricado por esse processo de manufatura. A figura 12, demonstra diferentes ações para mitigar distorções de soldagem.

Figura 12: Formas de minimizar as distorções de soldagem.



Fonte: Autor (2022).

Dentre as ações para minimizar distorções, se tem:

- **Compensação:** consiste em confeccionar um dispositivo de solda com dimensões de processo, ou seja, criar um dispositivo fora das tolerâncias de projeto, para ao final do processo o componente ficar dentro das tolerâncias;
- **Pré-Deformação:** consiste em tencionar o conjunto através de uma força, no sentido contrário da tendência de deformação;
- **Sequenciamento – Direção de Soldagem:** alterar sequenciamento e direções de soldagem, influenciam na magnitude das distorções;
- **Parâmetros:** alterar parâmetros – tensão, corrente, velocidade de soldagem, influenciam no aporte de calor e, conseqüentemente nas distorções;
- **Gravidade:** conjuntos muito pesados colocados e, posições adequadas podem atenuar as distorções;

- Soldar item crítico ao final do processo: assim o componente não deforma junto com os outros itens;
- Soldar cordões maiores por primeiro: assim, esses cordões vão ser resfriados dentro do dispositivo de solda;
- Geometria: distorções podem ser geradas devido a concentradores de tensões referentes a geometria do componente;
- Condições de contorno: Posição, quantidade, forças de grampos de retenção, mesas, cunhas, pinos, batentes, têm grande influência nas distorções;
- Resfriamento: Tempos de resfriamento, dentro ou fora do dispositivo influenciarão nas distorções.

Para cada conjunto a ser soldado é preciso analisar e encontrar uma solução viável para garantir tolerâncias de projeto solicitadas. Destas possíveis, a que vem sendo empregada na Stara S.A. com relativo sucesso são: condições de contorno, pré-deformação e sequenciamento.

2.3 MÉTODO DOS ELEMENTOS FINITOS

Tendo em vista o cenário industrial atual voltado para alta produtividade que envolvem problemas de engenharia que desafiam técnicos e engenheiros a trabalhar com projetos cada vez mais custosos, que requerem maior confiabilidade, segurança e restrições rigorosas. Para garantir tais características, modelos matemáticos podem ser elaborados para descrever o comportamento do equipamento ou peça requeridos em serviço. Neste caso então, entra as análises por Elementos Finitos, para se conseguir atingir estes objetivos com menor tempo e menor custo.

Em geral, o comportamento desses problemas é governado por Equações Diferenciais Parciais e a solução dessas por cálculo analítico é difícil, ou até mesmo insolúvel com as ferramentas convencionais disponíveis. Para contornar essa situação, ferramentas numéricas foram desenvolvidas com o propósito de solucionarem essas equações. Nesse sentido, o método dos Elementos Finitos atende a maioria dos problemas, podendo ser aplicado em diversas situações como problemas que possuem

regiões lineares ou não-lineares com domínio uni, bi ou tridimensional (DHATT; LEFRANÇOIS; TOUZOT, 2012).

Nesse meio, a simulação de soldagem é um problema desafiador, uma vez que o comportamento termomecânico de peças soldadas é um problema complexo por natureza e altamente não linear, envolvendo transformação de fase e deformação plástica das peças soldadas.

Dentre os conhecimentos necessários destaca-se;

- O completo entendimento sobre o tipo do elemento finito a ser utilizado,
- Formulação do elemento;
- Tamanho do elemento;
- Quantidade do elemento e;
- Funcionamento da simulação.

Estes conhecimentos são fundamentais para obter resultados condizentes com a realidade e usufruir ao máximo dos benefícios que a tecnologia oferece, além, da necessidade do conhecimento da metalurgia e no processo de soldagem.

Dentre os três métodos que se apresentaram ao longo do tempo para a solução de problemas semelhantes ao proposto (Diferenças Finitas, Elementos de Contorno, e Elementos Finitos), o Método dos Elementos Finitos vem sendo o escolhido devido a sua capacidade para realizar análises não lineares, onde uma pequena variação em seus parâmetros pode provocar uma enorme diferença no movimento. Além disso, a resposta a estímulos externos não é diretamente proporcional, e com grandes complexidades geométricas (GOLDAK; AKHLAGHI, 2005).

O MEF consiste em dividir o domínio da solução em regiões de forma simples, chamadas de elementos. Uma solução aproximada das equações pode ser desenvolvida para cada um destes elementos. A solução total é gerada juntando as soluções individuais, tomando-se o devido cuidado para garantir a continuidade nas fronteiras dos elementos (CANALE; CHAPRA, 2011). Podendo assim, ser empregado para simular o campo de temperaturas, as distorções e o campo de tensões residuais de um elemento submetido a um processo de soldagem. Assim, o MEF serviu de base para a simulação de soldagem do perfil de sustentação.

3 MATERIAIS E MÉTODOS

O objetivo deste item é apresentar os materiais empregados e a metodologia de trabalho utilizada. Adianta-se que a principal ferramenta aqui é o software de simulação *Simufact Welding*. Em função dos resultados dados pela análise realizada neste sistema, uma nova célula robótica e um dispositivo para soldagem do conjunto, perfil de sustentação, foram desenvolvidos e também serão apresentados neste item.

3.1 MATERIAIS

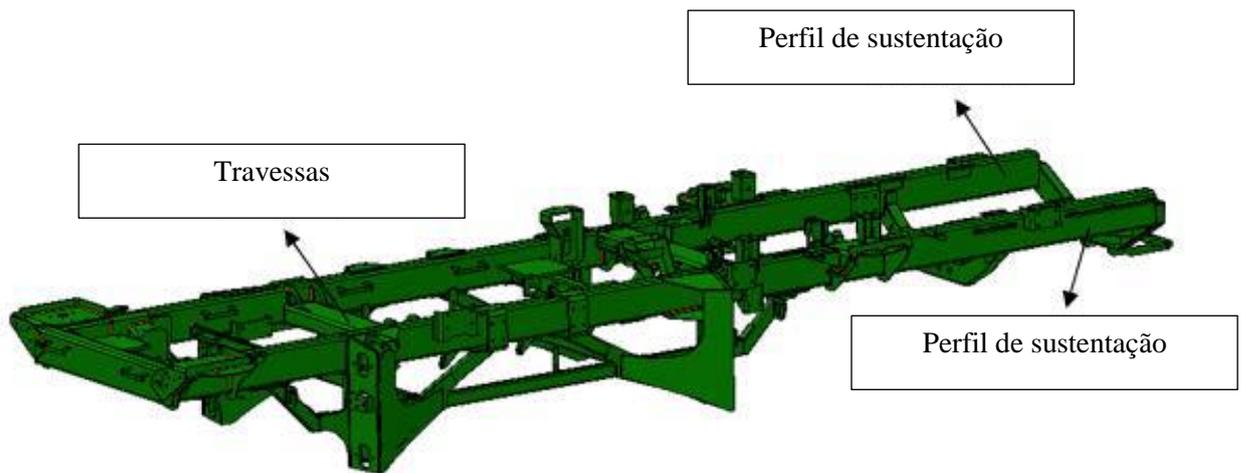
O produto analisado neste trabalho é um perfil de sustentação, subcomponente de um chassi de implemento agrícola (figura 13).

Os materiais que compõem o perfil de sustentação em sua maioria são aços comerciais e estruturais como o A36, LNE380, LNE600, SAE 1010/12 (Anexo A), além de um tubo de perfil retangular com dimensões de 100 de largura, 200 mm de comprimento e 6,3 mm de espessura, SAE 1006/1010. Todos estes com certificados de qualidade emitidos por parte dos fornecedores.

O comprimento total do tubo é de 6,5 m, que por norma, NBR8261 (ABNT, 1983) pode possuir 3,1 mm/m de torção. Entende-se por torção como valor do deslocamento da aresta longitudinal do perfil em relação ao plano horizontal, o que contribui para agravar as distorções de soldagem, com as seguintes propriedades:

- Módulo de elasticidade: $EL = 210 \times 10^9 \text{ Pa}$
- Coeficiente de Poisson: $\nu = 0,3$
- Densidade: $\gamma = 7850 \text{ kg/m}^3$
- Tensão de escoamento: $\sigma_{esc} = 700 \times 10^6 \text{ Pa}$

Figura 13: Modelo de chassi de um implemento agrícola.



Fonte: Stara (2022).

No perfil de sustentação apresentado na figura 13, são soldados componentes (peças) que servem de base para montagens posteriores, como por exemplo, carenagens, rodados e suportes. Dessa forma, têm-se diversas espessuras e materiais envolvidos no processo, sendo que estes se encontram em uma faixa de 4,75 mm à 12,5 mm de espessura. Na figura 14 abaixo, têm-se os parâmetros utilizados para simulação, os quais foram determinados por meio das especificações de soldagem (EPS) da empresa.

Figura 14: Parametrização para soldagem

Faixa de espessura	Corrente (A)	Tensão (V)	Velocidade (cm/min)
$4,75 \geq 6,35\text{mm}$	260	23	70
$6,35 \leq 12,5\text{mm}$	295	25	35

Fonte: Autor (2022).

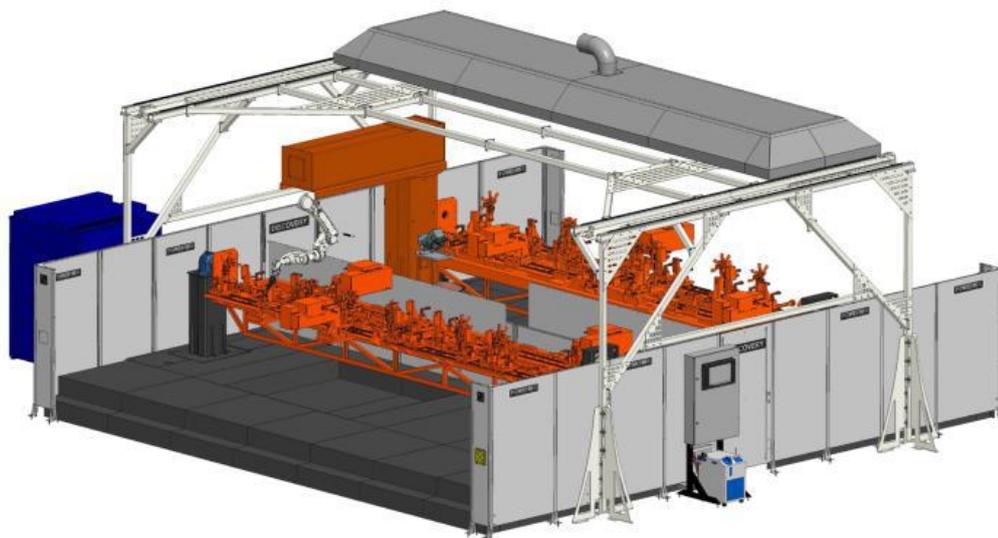
As misturas Ar + 20-25% CO₂ ou CO₂ puro foram empregados como gás de proteção. Como material de adição, foi utilizado o ER70-S6 Arame sólido cobreado, manganês-silício, destinado à soldagem MIG/MAG dos aços não ligados, como por exemplo os aços mecânicos em geral. Abaixo seguem mais detalhes sobre as propriedades do arame empregado.

- Diâmetro do arame: 1,2 mm
- Elongamento: 26%
- Tensão de escoamento: $\sigma_{esc} = 424 \times 10^6 \text{ Pa}$
- Resistência a tração = $518 \times 10^6 \text{ Pa}$
- Composição química básica: 0,06 - 0,15% C; 1,4 - 1,85 Mg; 0,8 - 1,15% Si.

Cada chassi de implemento é feito com pares de perfis de sustentação, um para o lado direito outro para o esquerdo, dessa forma, optou-se por realizar apenas interações virtuais (simulações), em cinco pares de perfis de sustentação. O que será descrito é o modelo classificado pela empresa como conjunto C. Este último teve todo processo de soldagem realizado em uma célula robótica que foi adquirida pela empresa Stara S.A, com dedicação exclusiva ao conjunto simulado.

A célula robótica (Figura 15), possui duas estações, uma para o lado direito do perfil de sustentação e outra para o esquerdo, e foi dimensionada (largura e comprimento) exclusivamente para o conjunto, e possui em sua estrutura; tombadores, guias lineares, grampos, batentes, torres e cilindros.

Figura 15: Célula Robótica para soldagem.



Fonte: Stara (2022).

Para este dispositivo fora utilizado em sua concepção alguns cilindros hidropneumáticos, da marca TOX (2022), modelo RZK (Figura 16), devido a força necessária, o mesmo é ideal para aplicações manuais e em robôs.

Figura 16: Cilindro TOX, RZK.



Fonte: Tox Pressotechnik (2022).

O cilindro acima, possui de 52 a 82 kN de força de prensagem, curso de potência de 7 a 12 mm e curso total e 200 mm. Mais especificações a respeito destes cilindros são encontradas no Anexo B. Esses atuadores podem ser ajustados com precisão por meio de um flange especial. Além da precisão, este procedimento visa garantir capacidade de

produção com o mínimo de distorções possível, mesmo sem guias adicionais para a ferramenta.

Para o procedimento, a célula de soldagem conta com um robô de solda Panasonic TM-1800 (figura 17), com 6 eixos de graus de liberdade, repetitividade de $\pm 0,1\text{mm}$, acionamento de eixos por servo motor, área de trabalho máxima acessível de 1802 mm e mínima de 480 mm (POWERMIG, 2022).

Neste robô, estão presentes os sistemas *Full Collision Detection* (Powermig, 2022) que nada mais é que a tecnologia de detectar uma colisão em qualquer eixo ou no sensor de colisão tradicional, realiza a parada instantânea do robô e gera a liberação dos eixos, evitando assim que cause algum dano na tocha ou no braço do robô. Já a ferramenta *Weld Navigation* (Powermig, 2022), pode ser comparado a um sistema de navegação no carro. Ela orienta o usuário na escolha do parâmetro utilizando uma variedade de páginas de dados garantindo que a meta de soldagem necessária seja atingida. Para encontrar o melhor parâmetro de soldagem para a aplicação, basta selecionar o tipo de junta e a espessura do material. O parâmetro restante será calculado automaticamente pela curva de sinergia e velocidade de soldagem configuradas automaticamente. Ferramentas específicas do robô de soldagem Panasonic.

Figura 17: Robô Panasonic TM-1800.



Fonte: Powermig 2022.

Para simulação e preparação do modelo, empregou-se uma Workstation Precision 5820 da marca DELL, o qual possui processador Intel Xeon W-2223 (4-core, 8-threads, cache de 8.25MB, até 3.90GHz Turbo), com SSD de 1TB PCIe NVMe M.2, Classe 40, além da memória de 128GB DDR4 (8x16GB) 2666MHz, esta configuração se faz necessária devido a trabalhar-se com análises não lineares exigindo-se assim uma *workstation* robusta.

3.2 MÉTODOS

Como apresentado anteriormente, se tem o desafio de realizar a soldagem do perfil de sustentação em uma célula de soldagem automática, porém, no processo atual este conjunto é apenas ponteadado (unido através de pontos) em um gabarito de solda específico. E após é montado em outro dispositivo de soldagem juntamente com as travessas e soldado.

Assim, surge o desafio de encontrar a tendência de deformação do conjunto visto que não se tem dados preliminares do perfil soldado. Dessa forma, será adotada uma sequência de trabalho, exemplificada abaixo, aplicando o método dos Elementos Finitos por meio da ferramenta *Simufact Welding*.

1. Pré-Processamento;
2. Condições de contorno;
3. Análise da tendência de deformação;
4. Criação de novas condições de contorno, conforme a seção 2.1.1.

Esta sequência visou encontrar virtualmente a tendência de deformação que o processo de soldagem acarreta no perfil de sustentação, servindo de base para criação de novas condições de contorno e para o projeto do dispositivo de soldagem. Em outras palavras, a simulação forneceu os dados que faltavam para se conseguir amenizar as distorções por meio de artifícios como a pré-deformação, modificação de parâmetros e condições de soldagem, novas condições de contorno, mudança no material etc.

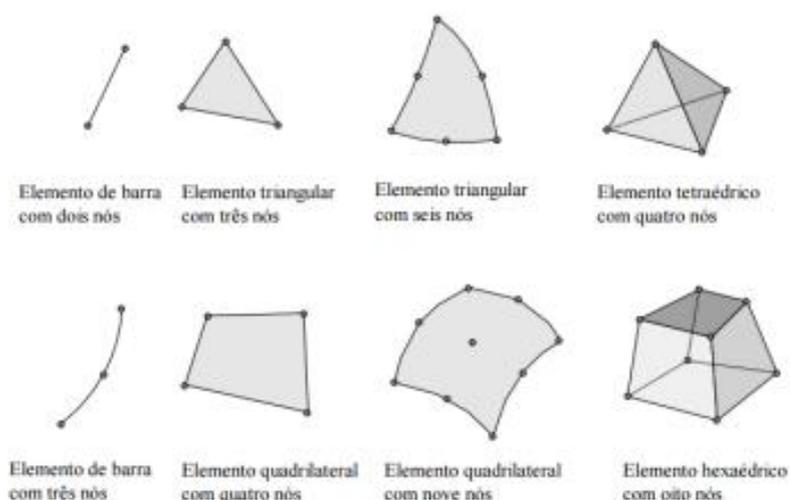
3.2.1 Pré-Processamento do item

Como é de conhecimento para aqueles familiarizados com o MEF, antes de qualquer análise virtual de um conjunto mecânico, se tem o pré-processamento do item, onde realiza-se a criação da malha e das condições de contorno.

A malha pode ser dividida em vários formatos, entre eles usualmente se destacam o formato triangular, tetraédrico, quadrilátero e hexaédrico. Cada formato tem suas especificações, métodos e peculiaridades. Pode-se agrupá-las em dois grupos: um grupo contendo os formatos triangular e tetraédrico, e outro grupo contendo os formatos quadrilátero e hexaédrico (OWEN,1998).

Como exemplo destes formatos, a Figura 14 de Souza (2003) mostra como são esses elementos.

Figura 18: Modelos de elementos de malha.



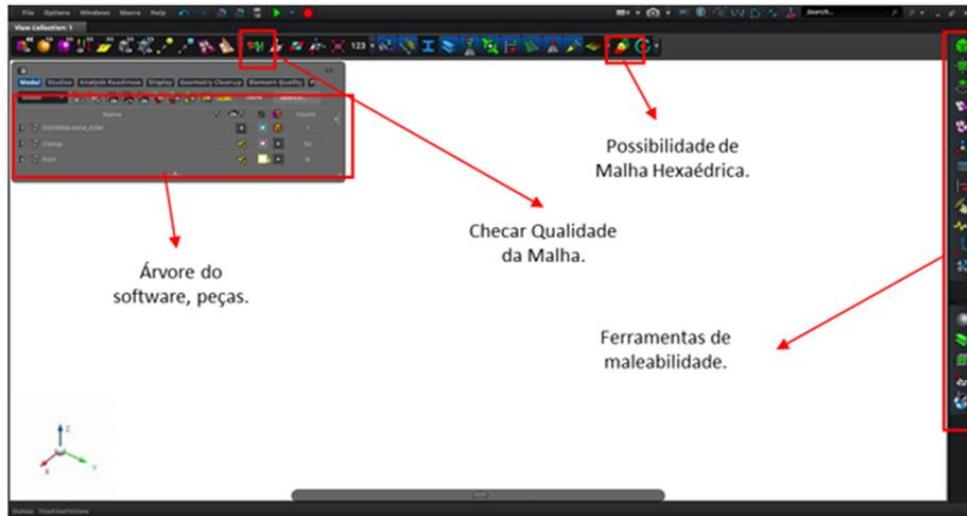
Fonte: Souza (2003).

O elemento sólido hexaédrico foi empregado na simulação descrita aqui e é caracterizado como tri-linear, tendo, portanto, geometria tridimensional. Por essa quantidade ser consideravelmente baixa em relação a outros tipos de elemento, ele pode ser considerado como de baixa ordem, que não tem alta complexidade.

Para a confecção do modelo de Elementos Finitos, utilizou-se o software *MSC Apex*, onde se tem a interface exemplificada na Figura 15. Atribuindo diferentes tamanhos

de malhas, nas regiões de maior aporte térmico (regiões de interesse) com 4 mm e nas demais regiões com 10 mm.

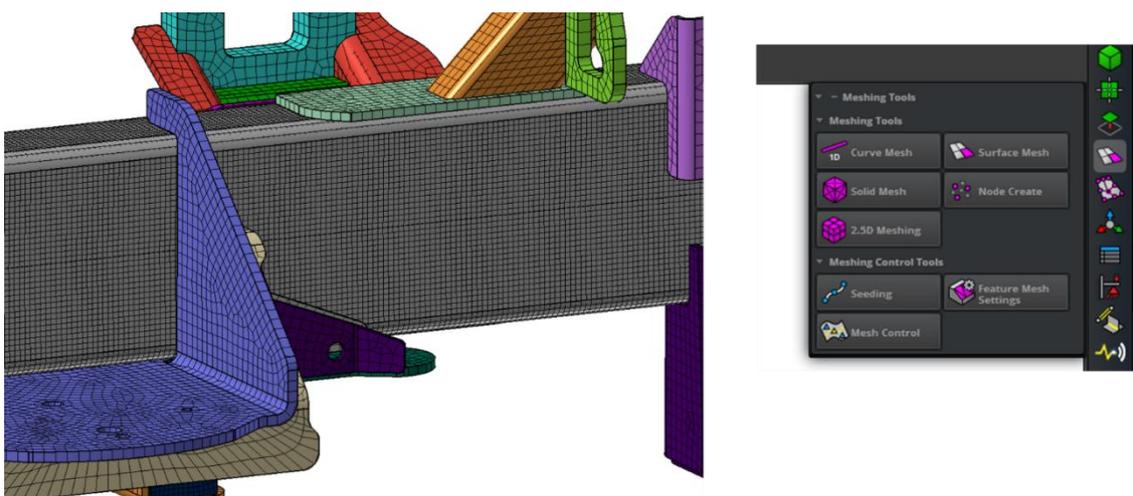
Figura 19: Interface Software MSC APEX.



Fonte: Autor (2022).

A Figura 16 ilustra os tipos de malhas que o *software MSC Apex* possui, que vai desde sólida, superfície, em apenas uma direção (usada para tubos apenas), além da tridimensional (2.5D Meshing) utilizada no presente trabalho. O modelo foi elaborado com 389.721 nós e 244.557 elementos.

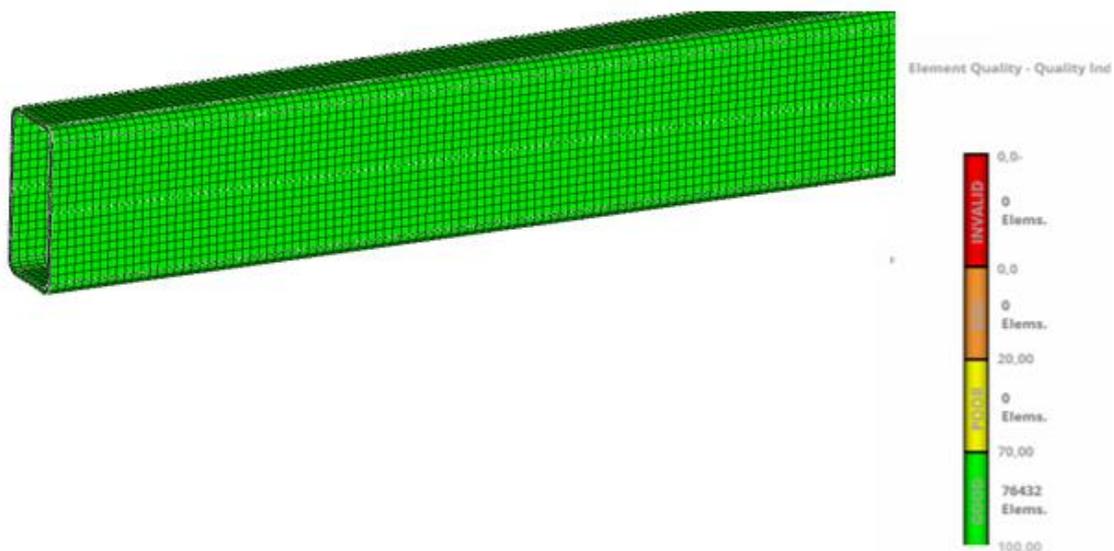
Figura 20: Interface de malhas Apex.



Fonte: Autor (2022).

O *Element Quality* é um parâmetro de qualidade da malha, muito importante no pré-processamento do item. A respeito disso, Gonçalves Jr (2011) coloca como critério da qualidade “a razão entre o volume de um elemento hexaédrico dividido pelo comprimento de uma aresta do elemento”. Assim sendo, uma simulação irá obter um valor entre 0 e 1 sendo que o valor 1 refere-se a um quadrado ou cubo perfeito (qualidade “máxima” de simulação) e o valor 0 indica um elemento ruim como volume negativo ou zero. Dessa forma, quanto mais resultados “1” se consegue no conjunto, menor a probabilidade de erros durante a simulação do mesmo. Pode se ver esse índice na figura 21 abaixo. Quanto mais elementos bons, em verde, maior a qualidade da malha e menor a chance de erro durante o processamento.

Figura 21: Detalhes da malha e sua qualidade.



Fonte: Autor (2023).

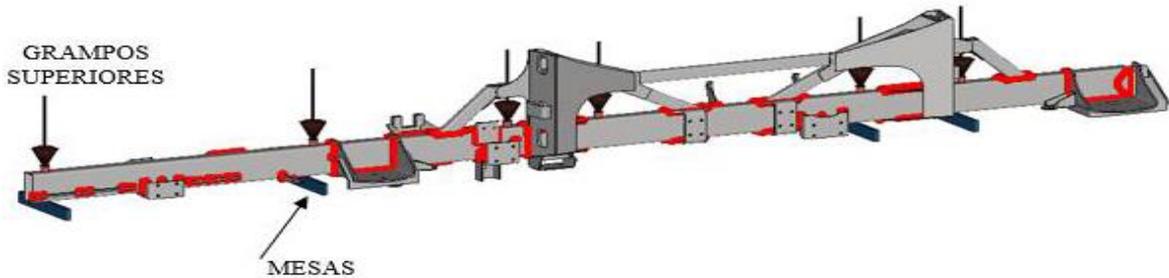
3.2.2 Condições de contorno utilizadas

Conforme comentado anteriormente não há dados de comportamento prático da soldagem deste conjunto. Para servir de subsídio na criação de condições de contorno no ambiente virtual, dessa forma, realizou-se a idealização de condições de contorno. No modelo, se utilizou mesas e grampos superiores apenas para segurar o modelo, pois sem

uma base ou uma força contrária o mesmo gera divergências na análise e demora para gerar resultados, pois o programa entende que a peça está “voando”.

A figura 22 mostra as condições de contorno utilizadas para simulação virtual.

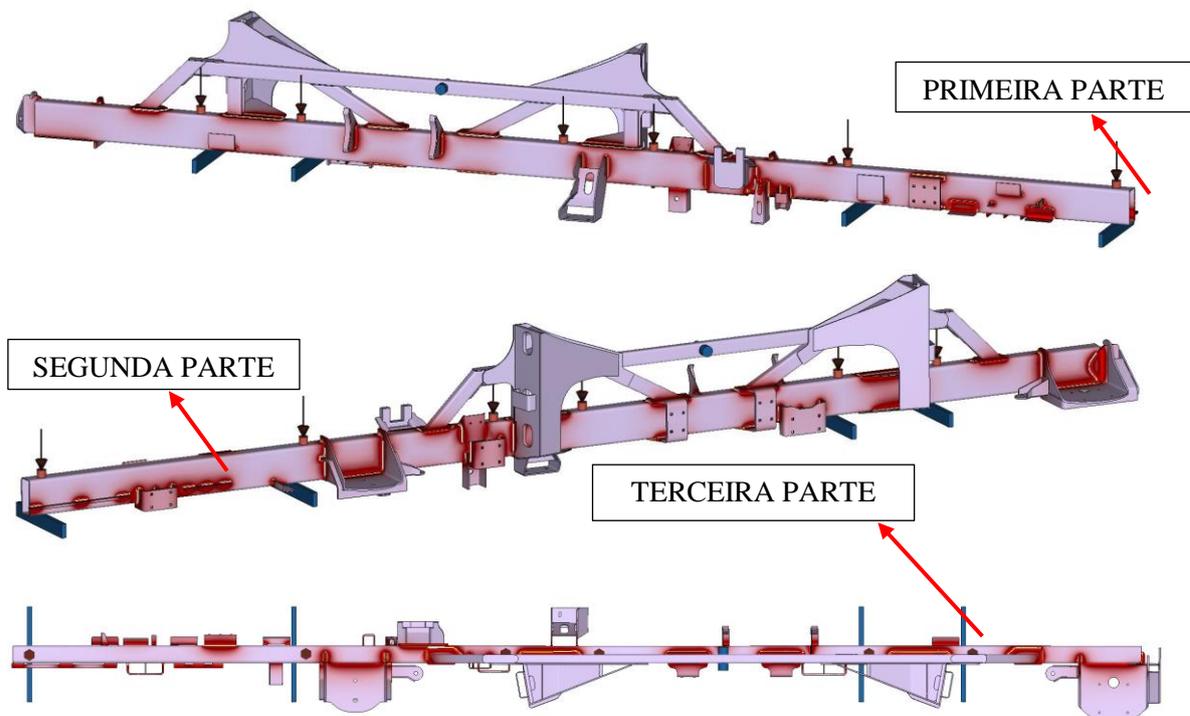
Figura 22: Condições de contorno utilizadas para simulação.

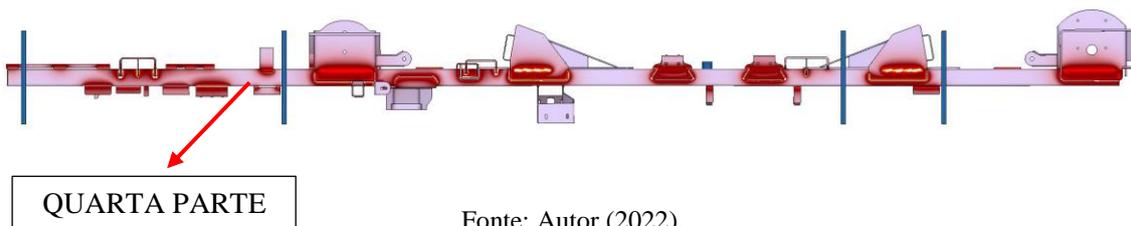


Fonte: Autor (2022).

Outro fator importante no quesito condições de contorno, é o sequenciamento de soldagem, pois com um bom sequenciamento se pode distribuir o calor gerado, diminuindo sua influência nas distorções. Como salientado anteriormente, não se tinha a sequência realizada na prática, dessa forma optou-se por defini qual seria a melhor sequência de soldagem, e essa está exemplificada na figura 23.

Figura 23: Sequência de soldagem do perfil de sustentação.





Fonte: Autor (2022).

Todo o modelo e seu sequenciamento resultaram em 20 metros de solda perfazendo 232 cordões de soldas na simulação. Sendo assim, com os dados de entrada definidos tais como: parâmetros, restrições, materiais, temperaturas de entrada, trajetórias de solda, o software calcula para cada nó do modelo numérico resultados de temperaturas, tensões, distorções, forças nos componentes em todo o tempo ciclo do conjunto.

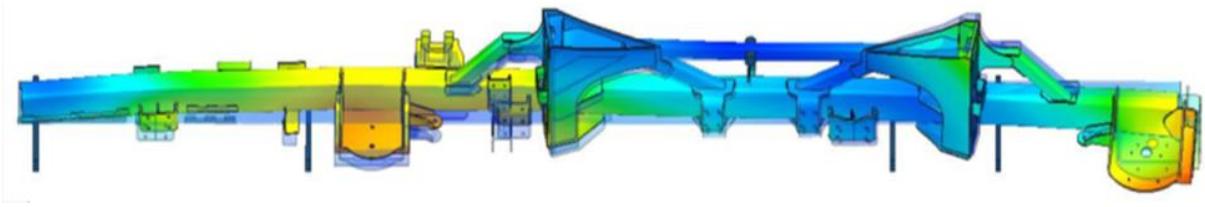
Sua interpretação, gerará subsídios para entender o comportamento do conjunto e encontrar maneiras otimizadas de garantir suas dimensões.

3.2.3 Análise da tendência de deformação

Como se está lidando com não-linearidade, as análises tendem a demorar mais tempo para processar resultados. Conforme Carvalho (2022), uma análise não-linear é uma análise em que uma relação não-linear é mantida entre as forças aplicadas e os deslocamentos. Efeitos não-lineares podem se originar de não-linearidade geométrica (ou seja, grandes deformações), que é a que trata o presente trabalho; não linearidade de material (ou seja, material elasto-plástico) e contato. Esses efeitos resultam em uma matriz de rigidez que não é constante durante a aplicação da carga. Isso se opõe à análise linear, onde a matriz de rigidez permaneceu constante

A simulação relatada neste trabalho levou 125 horas para realizar todas as trajetórias de soldas desenhadas anteriormente (20 m). Após este processo, tem-se mais um passo que exige tempo de processamento por parte do software, que se chama *Unclamping* que é a retirada de restrições, grampos e mesas para termos o resultado virtual de deformação além do resfriamento da peça. Têm-se 132 horas de análise para o modelo em questão, totalizando 5 dias e meio de simulação ininterrupta. Nota-se o resultado da tendência de deformação do processo na figura 24.

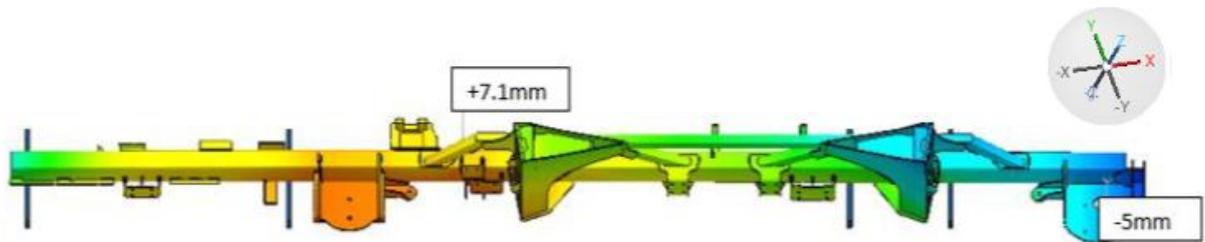
Figura 24: Tendência de deformação.



Fonte: Autor (2022).

Com o modelo na temperatura ambiente (20°C) e sem os grampos superiores, verificou-se as distorções no eixo vertical (Y) (direção transversal ao *perfil de sustentação*), é onde ocorrem os maiores deslocamentos. A figura 25, mostra que o deslocamento em “Y” deverá ser de +7,1 mm nas proximidades da região central do perfil de sustentação. Já os deslocamentos nas extremidades são de -5 mm na direita e de zero na esquerda do *perfil de sustentação* (ver figura 25). A mesma, possui em seu canto direito superior o sentido de deslocamento adotado no modelo.

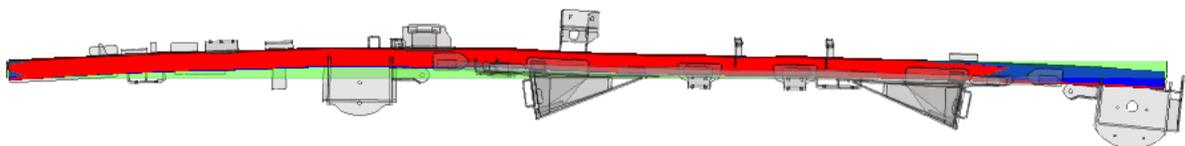
Figura 25: Grandeza de deslocamentos em Y.



Fonte: Autor (2022).

Vê-se, em escala maior na figura 26, o sentido das deformações que ilustram melhor os efeitos gerados pelo processo.

Figura 26: Tendência de deformação.



Fonte: Autor (2022).

Com estes resultados, pode-se começar a definir novas condições de contorno, ou seja, um procedimento de soldagem com um dispositivo de soldagem modificado a fim de minimizar as distorções citadas no parágrafo anterior. Estas novas condições de contorno serão apresentadas no item seguinte.

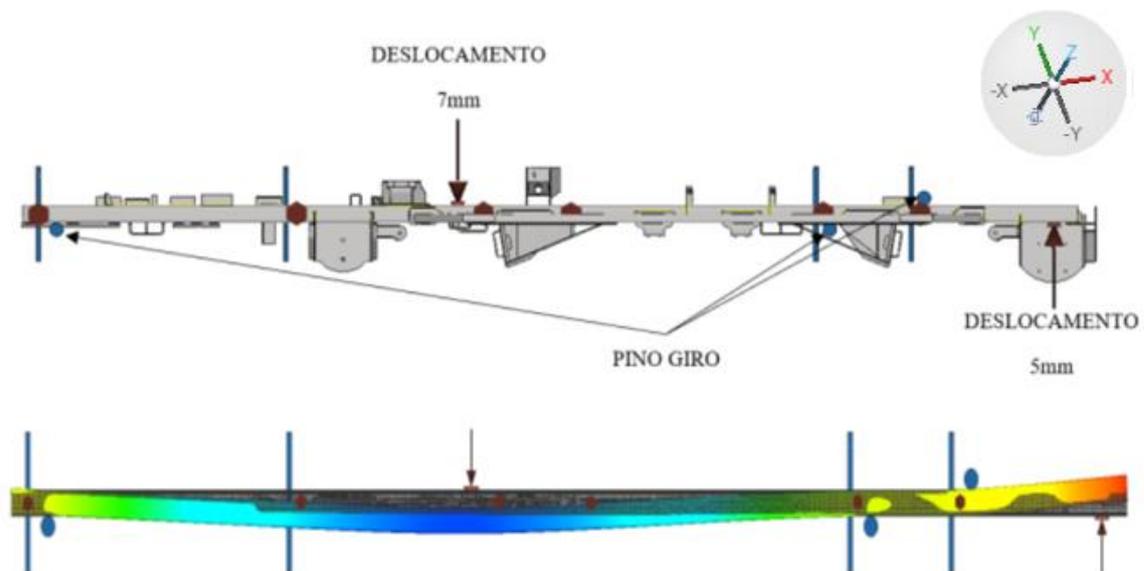
4 RESULTADOS E DISCUSSÃO

Conforme citado na seção 2.1.1, há várias maneiras de minimizar as distorções, uma delas é com a pré-deformação para o conjunto em análise. Com os resultados de distorções fornecidos pela análise de tendência, foi necessário a adição de algumas condições de contorno novas, como pinos de giro, a sequência de soldagem não foi alterada.

Assim, com o conjunto montado e pontado nas dimensões de projeto, desloca-se as regiões de maiores deformações no sentido contrário, através de uma força fornecida pelos cilindros hidropneumáticos, além de pinos de giro para realizar a alavanca e pré-deformar o conjunto, além de manter-se as restrições já comentadas na seção 3.2.2.

Na extremidade direita, conforme mostrado na figura 27, deslocou-se 5 mm positivos e na região central 7 mm negativos utilizando-se dos eixos de referência Y.

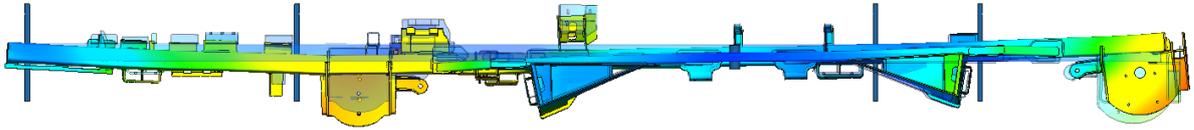
Figura 27: Novas condições de contorno.



Fonte: Autor (2022).

O modelo é pré-deformado dentro do regime elástico, para que no fim do processo de soldagem a peça volte a sua posição inicial, ou seja, quase sem deformações. A figura 28 mostra o modelo deformado no início do processo.

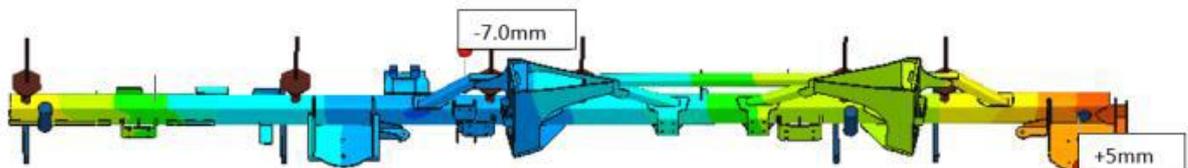
Figura 28: Novo modelo numérico com pré deformação.



Fonte: Autor (2022).

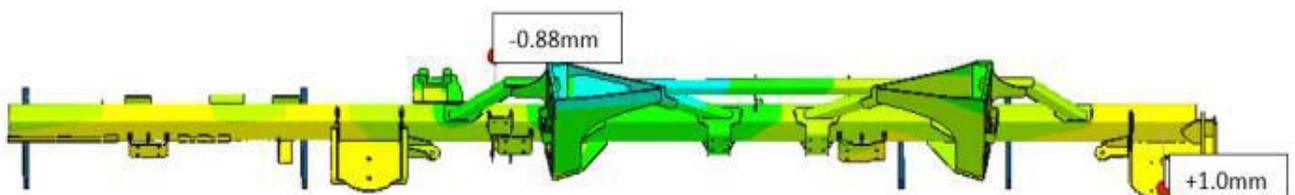
A figura 29 mostra um modelo na qual foi realizada a pré-deformação. Tem em seguida o modelo soldado no estado pré deformado da (7 mm no centro e 5 mm na extremidade). Com o modelo resfriado e retirando as forças de pré-deformação, interpretaram-se os resultados das novas distorções. A figura 30, mostra as distorções ao final do processo do modelo.

Figura 29: Modelo no seu estado inicial, sem pré-deformação.



Fonte: Autor (2022).

Figura 30: Deslocamentos após pré-deformação.



Fonte: Autor (2022).

Na extremidade direita obtiveram-se deslocamentos máximos de +1mm, redução de 80% nas distorções naquela região. Na região central obteve-se deslocamento máximo de 0,88mm, redução de 87,4% nas distorções naquela região.

Numericamente, a forma de minimizar distorções de soldagem através da pré-deformação foi exitosa.

4.1.1 Validação do modelo (Virtual vs. Real)

A validação do modelo computacional é definida como “processo de provar que o modelo se comporta com precisão satisfatória, consistente com os objetivos do projeto” (Gabriel et al., 2018).

Utilizou-se, para a validação deste modelo virtual utilizou-se dados reais provenientes de quatro amostras, as quais foram mensuradas após a soldagem na célula robótica. O comparativo foi feito pela média das medidas da amostra e das medidas virtuais do modelo. (Os quais não obtive liberação para divulgar ou postar).

Por ordem, primeiro realizou-se o saneamento dos dados e cálculos de média, desvios, erro e erro absoluto através do *Microsoft Excel*, dos modelos reais que serviram de testes para a validação tanto do robô de solda quanto da simulação.

Estes dados são conferidos na Tabela 2 abaixo, o erro foi definido como a diferença entre os dados numéricos e experimentais. A média dos erros absolutos foi de 1,07 mm, o que é considerado adequado tendo em vista as tolerâncias de projeto bem como dimensões e complexidade do modelo.

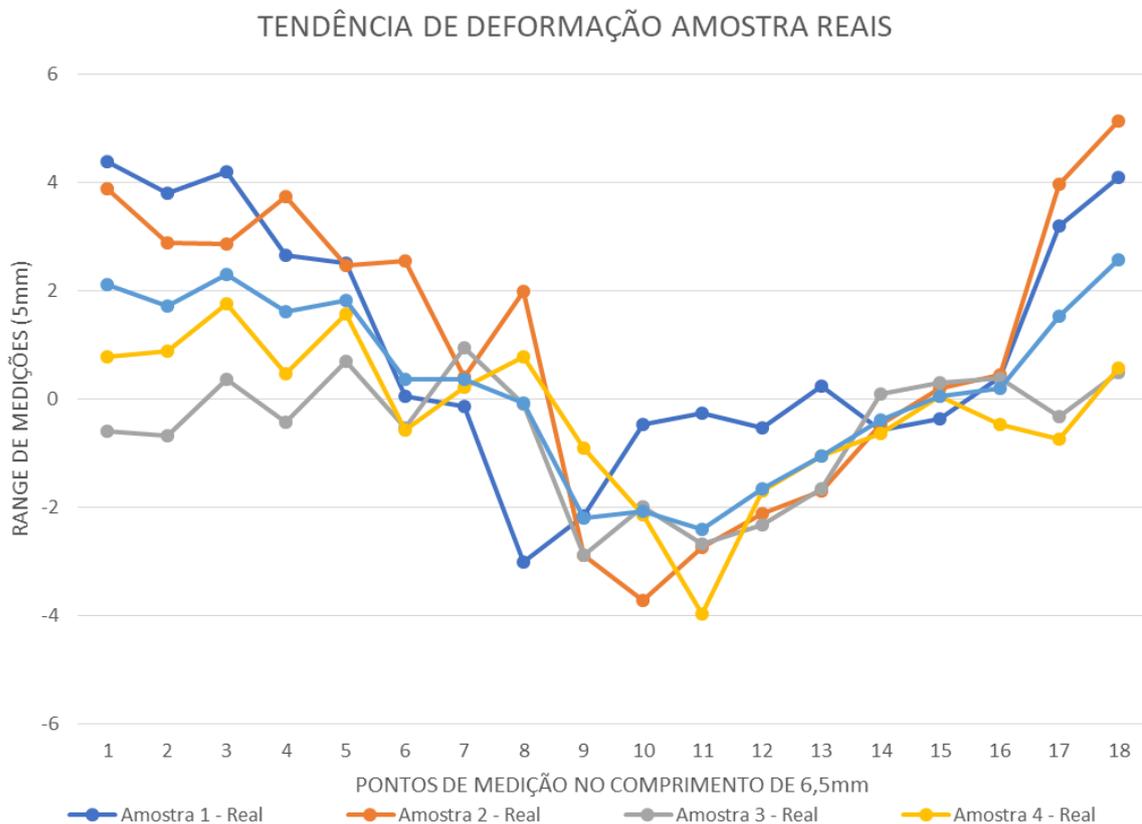
Tabela 1: Dados das amostras virtual e reais.

Amostra 1	Amostra 2	Amostra 3	Amostra 4	MÉDIA	DESVI O	VIRTUAL	ERRO	ERRO ABSOLUTO
4,38	3,88	-0,6	0,78	2,11	2,2891	-0,1	-2,21	2,21
3,81	2,89	-0,69	0,89	1,725	1,9114	-0,7	-2,425	2,425
4,19	2,87	0,36	1,77	2,2975	1,7439	0,25	- 2,0475	2,0475
2,65	3,75	-0,43	0,46	1,6075	1,8175	-0,44	- 2,0475	2,0475
2,51	2,47	0,7	1,58	1,815	1,1007	0,61	-1,205	1,205
0,04	2,56	-0,53	-0,58	0,3725	1,2970	1,03	0,6575	0,6575
-0,14	0,41	0,94	0,21	0,355	0,4219	0,8	0,445	0,445
-3,01	1,99	-0,1	0,78	-0,085	1,8450	-0,9	-0,815	0,815
-2,15	-2,9	-2,89	-0,9	-2,21	1,2812	-2,4	-0,19	0,19
-0,47	-3,73	-2	-2,14	-2,085	1,4834	-2,8	-0,715	0,715
-0,26	-2,74	-2,68	-3,98	-2,415	1,7273	-1,9	0,515	0,515
-0,53	-2,11	-2,33	-1,7	- 1,6675	1,0191	-2	- 0,3325	0,3325
0,23	-1,7	-1,66	-1,05	-1,045	0,9092	-1,34	-0,295	0,295

-0,58	-0,47	0,09	-0,63	-	0,3379	0,095	0,4925	0,4925
-0,36	0,19	0,31	0,04	0,045	0,2534	0,4	0,355	0,355
0,4	0,45	0,39	-0,48	0,19	0,3967	0,62	0,43	0,43
3,2	3,97	-0,32	-0,74	1,5275	2,1900	-0,2	-	1,7275
4,1	5,13	0,49	0,57	2,5725	2,3725	0,31	-	2,2625
							2,2625	2,2625
MÉDIA DO ERRO ASBOLUTO								1,07

Após este saneamento se teve o gráfico com linhas de tendências de deformação dos modelos reais. Pode-se notar as linhas de deformação das amostras no gráfico da figura 31.

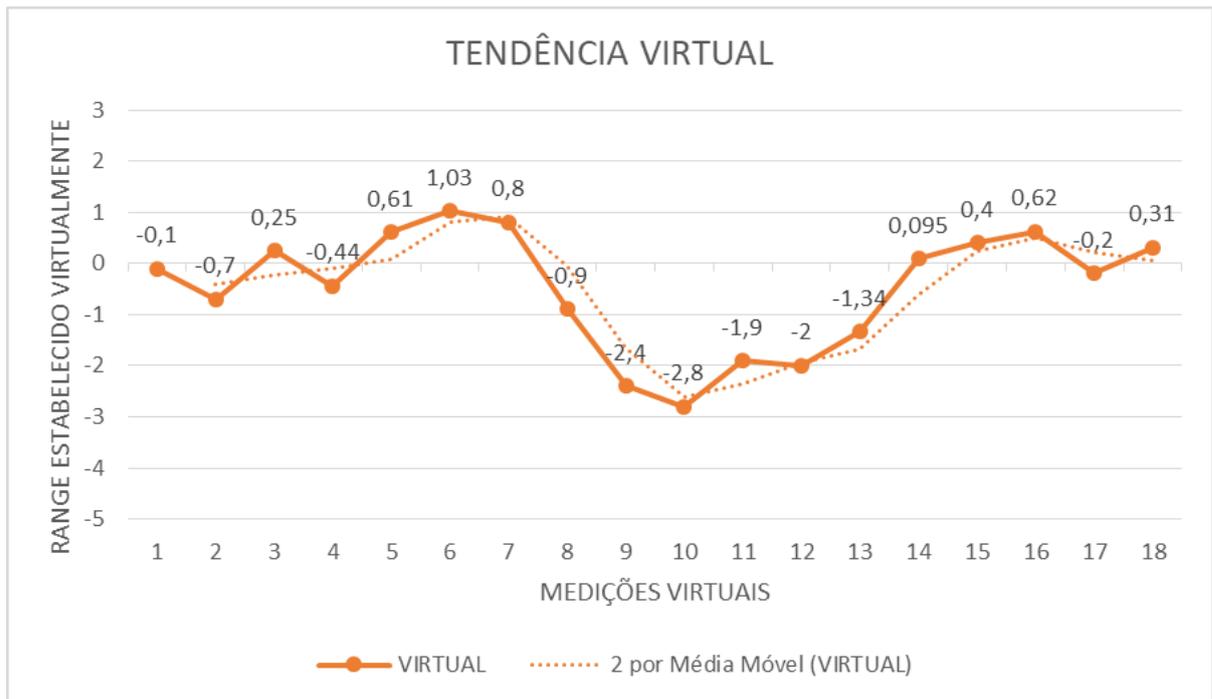
Figura 31: Tendências de deformação das amostras reais.



Fonte: Autor (2022).

Para o modelo virtual, utilizou-se o mesmo processo que nas amostras reais, ou seja, foi plotado os dezoito pontos selecionados, nos mesmos pontos aferidos na prática pela medição, pontuamos no software ao longo do perfil de sustentação e verificou-se os seus deslocamentos. Nota-se sua tendência de deformação na figura 32.

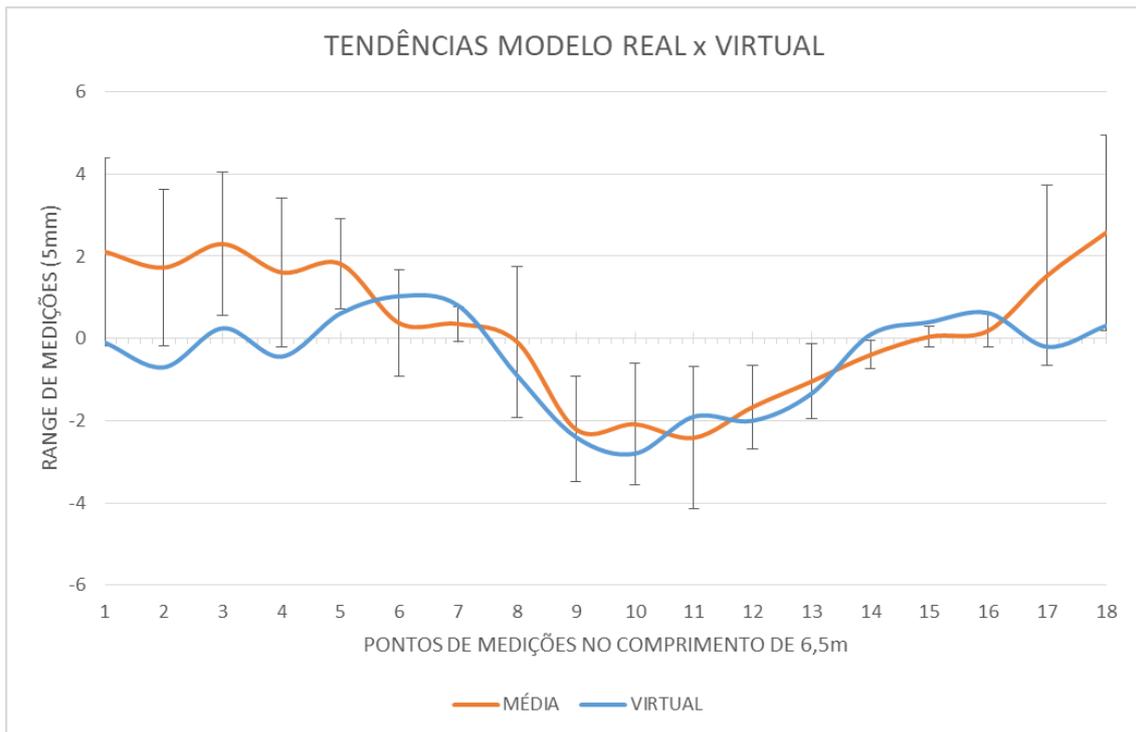
Figura 32: Dados da tendência de deformação virtual.



Fonte: Autor (2022).

Para a validação do modelo virtual com o real, pegou-se a média das quatro amostras aferidas juntamente com os desvios padrão dos valores experimentais, dessa forma, se tem um gráfico com a média dos modelos reais com a tendência do modelo virtual, e comparamos suas linhas. Assim, nota-se na figura 33 que a maioria dos valores numéricos estão dentro dos desvios padrão dos valores experimentais, sendo assim válidos.

Figura 33: Comparação modelo real e virtual



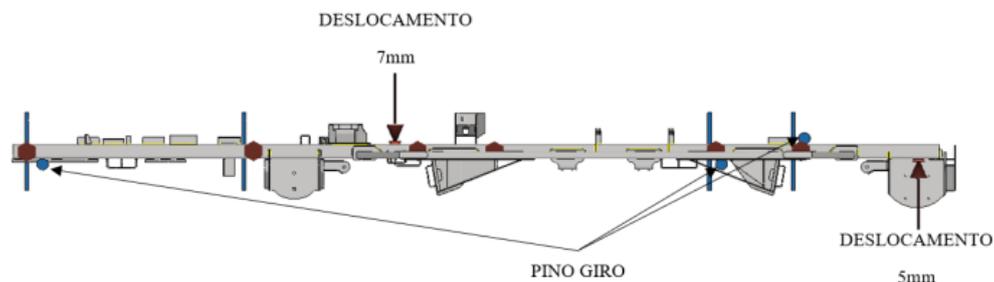
Fonte: Autor (2022).

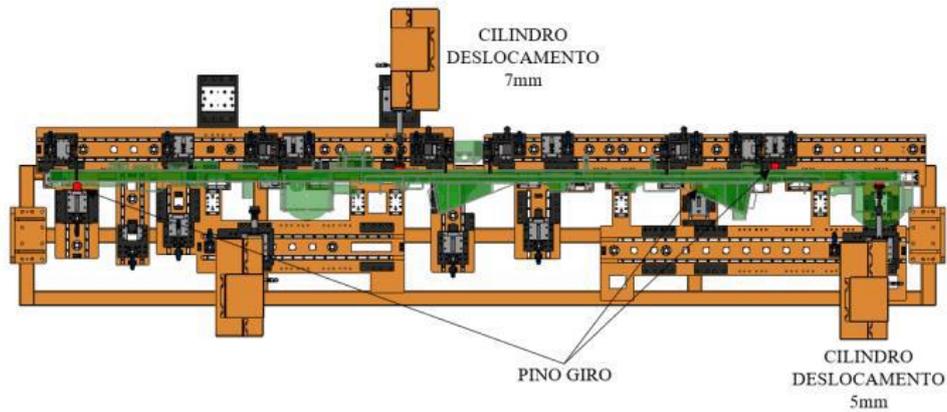
4.1.2 Projeto do dispositivo de solda

Utilizou-se os resultados obtidos no software *Simufact Welding*, para o projeto do dispositivo de soldagem. A confecção do dispositivo se baseou, exatamente, nos modelos analisados.

A força para tencionar o material para gerar os deslocamentos da pré-deformação encontrou-se na simulação, são indicadas na figura 34, deslocamento de 7 mm no centro da peça e 5 mm na extremidade direita, facilitando e otimizando a seleção dos cilindros utilizados, conforme comentado na seção 3.1, cilindro hidropneumáticos.

Figura 34: Projeto do Dispositivo com o resultado da simulação.

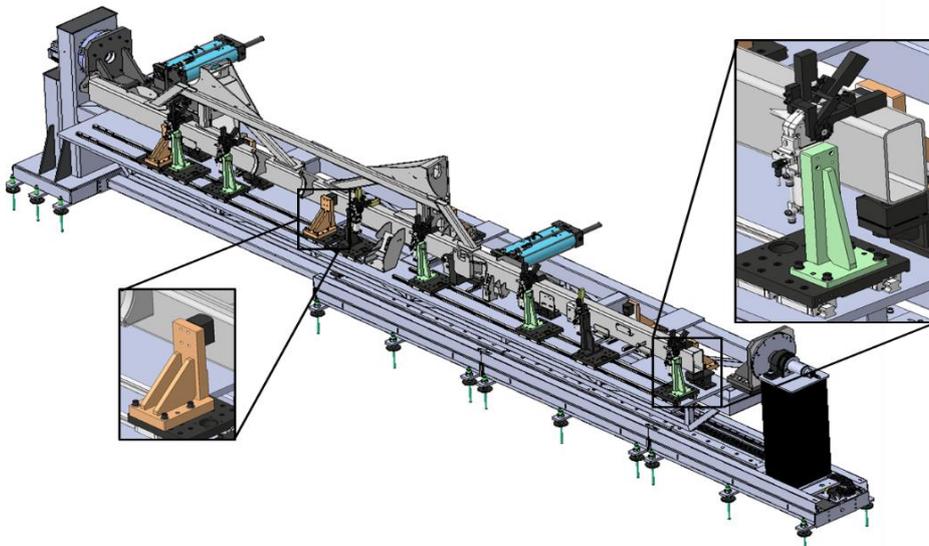




Fonte: Autor (2023).

O dispositivo foi feito para contemplar de um lado da célula o lado direito do perfil de sustentação, e no outro o lado esquerdo, além de, serem fixos na célula de soldagem. O mesmo é composto por grampos, pinos guias, cilindros e torres de grampos pneumáticos, estes se comunicam com a célula para fechar ou abrir, se pode ver mais detalhes destes componentes na figura 35.

Figura 35: Detalhes da composição do dispositivo.



Fonte: Autor (2023).

Buscou-se otimizar o máximo o tempo de setup, (que é o deslocamento ou troca de guias, torres e cilindro) entre os modelos absorvidos pelo dispositivo, durante teste dos modelos de perfis juntamente como o robô e a célula de soldagem) o tempo foi de 40 minutos, o que para a produção em larga escala é aceitável, devido à complexidade e número de modelos soldados.

Dessa forma, a simulação foi de suma importância para o projeto de dispositivo, otimizando tempo de projeto e de teste.

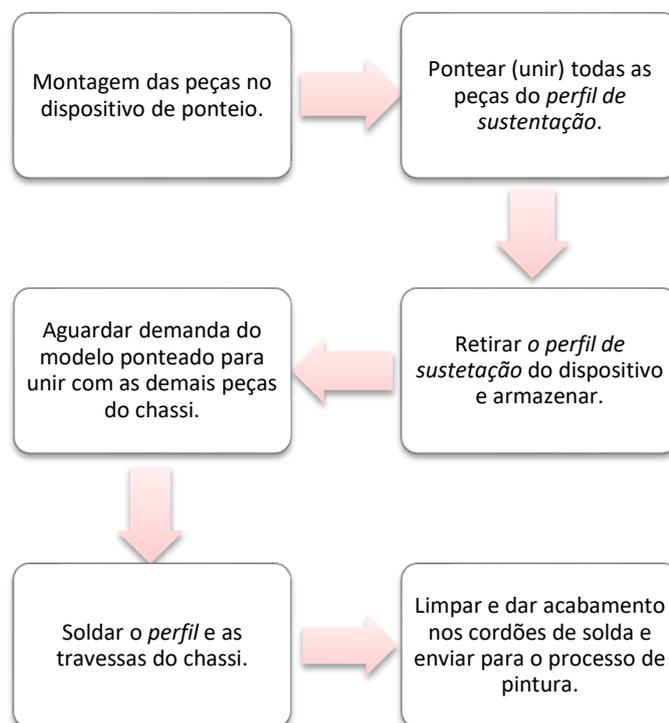
4.1.3 Melhorias do processo

Com a mudança de processo de soldagem do componente, se teve ganhos significativos em tempo e em custos.

Anteriormente, tinha-se que seguir o fluxo de processos de; montar o perfil de sustentação em seu dispositivo de ponteio; pontear as peças que são ligadas ao perfil; retirar a mesma do dispositivo e aguardar a demanda; soldar o perfil de sustentação e as travessas do chassi; limpar e dar acabamento nos cordões de solda e enviar para o processo pintura.

Este fluxo é exemplificado no fluxograma da figura 36.

Figura 36: Fluxograma exemplificando o processo.



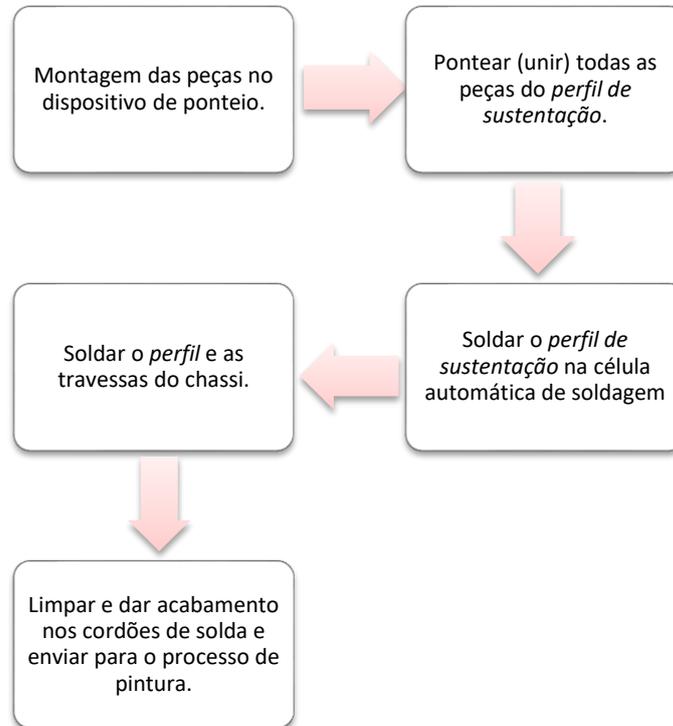
Fonte: Autor (2023).

Com a inserção da célula robotizada de soldagem, se tem ganho de tempo e otimização de processo, pois encurta-se o tempo de atravessamento, assim, o seguinte fluxo é realizado; montar o perfil de sustentação em seu dispositivo de ponteio; pontear as peças que são ligadas ao perfil; movimentar o perfil para célula de soldagem e soldar

o mesmo; soldar apenas as travessas com o perfil; limpar e dar acabamento nos cordões de solda e enviar para o processo pintura.

Este fluxo é exemplificado no fluxograma da Figura 33.

Figura 37: Fluxograma do novo processo com a inserção da célula robótica.



Fonte: Autor (2023).

Em relação a valores de ganhos, no que diz respeito a tempo de soldagem, o chassi do implemento passou de 4 horas e meia, para 3 horas e quinze minutos, além dos ganhos em não ter mais não conformidades (retrabalhos), como o de esquecer cordões de solda, e das distorções que causam a não conformidade de dimensões de projeto.

Estes ganhos são mostrados nas Tabela 3, os custos de hora homem e hora máquina são tabelados pela empresa, a demanda anual é com base na carteira de implementos vendidos.

Tabela 2: Ganhos na melhoria/modificação do processo

ANTES		X	DEPOIS	
CUSTO HORA SOLDADOR	R\$ 133,50		CUSTO HORA MÁQUINA (Robô)	R\$ 140,00
DEMANDA ANUAL	800		DEMANDA ANUAL	800
TEMPO DO PROCESSO	04:30:00		TEMPO DO PROCESSO	03:00:00
CUSTO DE RETRABALHO/peça	R\$2.000,00		CUSTO DE RETRABALHO/peça	R\$ 0,00
TOTAL	R\$ 460.000,00		TOTAL	R\$ 336.000,00

Fonte: Autor (2023).

Assim, se tem uma redução de aproximadamente R\$ 124.000,00 (cento e vinte e quatro mil reais) reais somente inserindo a soldagem automatizada do perfil de sustentação. Inserindo o custo de retrabalho, fornecido pelo setor de qualidade da empresa Stara S/A, 15 casos de não conformidades envolvendo tanto os perfis de sustentação quanto o chassi aconteceram no ano de 2022, o custo de retrabalho é em média R\$2.000,00 (dois mil reais), dessa forma, custa R\$30.000,00 (trinta mil reais) por ano em retrabalhos devido as distorções de soldagem.

Logo, a redução somando tanto a de tempo quanto a de evitar as não conformidades causadas pelas distorções dão um ganho aproximado de R\$ 154.000,00 (cento e quarenta e dois mil reais) o que para a empresa é expressivo levando em consideração a demanda de produtos que utilizam este componente, além de entregar com mais qualidade para o cliente externo e interno.

5 CONCLUSÕES E SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS

Este trabalho teve como objetivo apresentar a simulação numérica na indústria de implementos agrícolas como forma de minimizar as distorções causadas pela soldagem de um componente agrícola.

Também serviu de base de base para a implementação de uma célula robótica de soldagem para o componente perfil de sustentação, o qual é peça chave de um chassi de um implemento agrícola da empresa Stara S.A, o mesmo teve como desafio maior minimizar as distorções de soldagem que ocorreriam no processo caso o mesmo não fosse estudado e simulado.

Além de, o dispositivo de soldagem desta célula ser projetado e construído com base nos dados de simulação a fim de minimizar o tempo de teste e de soldagem do conjunto.

No ponto de vista empresarial, a tecnologia de simulação trouxe ganhos ímpares, por ser algo novo e inovador tivemos quebras de paradigmas quanto a utilização da técnica de pré deformação como meio de minimizar as distorções de soldagem. Este teve um retorno financeiro e de qualidade ao produto final, seja em sua redução de tempo de processo ou em não ter mais retrabalhos em máquinas a campo ou na própria linha de montagem.

Os conhecimentos adquiridos ao da graduação auxiliaram também na resolução deste e de outros problemas envolvendo quesitos estruturais ou de soldagem.

Por fim, a utilização da simulação e da pré-deformação como meio de minimizar as distorções de soldagem em um componente agrícola se mostrou viável financeiramente e assertiva, garantindo assim retornos em qualidade e financeiros a empresa que utiliza está ferramenta e técnica.

5.1 SUGESTÕES TRABALHO FUTUROS

Para trabalhos futuros as seguintes ideias e hipóteses podem ser estudadas;

- Melhorar o sequenciamento por parte da programação do robô de solda;
- Melhorar acessos de solda, para aumentar a produtividade;

- Estudar a implementação de uma nova célula robótica para soldar todo o chassi do implemento;
- Reanalisar o perfil de sustentação com base no programado para o robô;
- Avaliar os processos iniciais, corte e dobra, juntamente com seus parâmetros, afim de diminuir as tensões residuais destes processos nos componentes;

REFERÊNCIAS

ABNT. **NBR 8261**: Perfil tubular, de aço-carbono, formado à frio, com e sem costura, de seção circular, quadrada ou retangular para usos estruturais. Rio de Janeiro: Abnt–Associação Brasileira de Normas Técnicas, 1983. Disponível em: file:///C:/Users/User/Downloads/idoc.pub_nbr-8261-perfil-tubular-estrutural-de-aco-carbono-formado-a-frio1.pdf. Acesso em: 12 nov. 2022.

BACCIN, André Pischke. **ANÁLISE DE DISTORÇÕES EM COMPONENTES ESTRUTURAIS DE UMA CARROCERIA DE ÔNIBUS CAUSADAS PELO PROCESSO DE SOLDA**. 2021. 69 f. TCC (Graduação) - Curso de Engenharia Mecânica, Universidade de Caxias do Sul, Caxias do Sul, 2021. Disponível em: <https://repositorio.ucs.br/xmlui/bitstream/handle/11338/8568/TCC%20Andre%20Pischke%20Baccin.pdf?sequence=1&isAllowed=y>. Acesso em: 10 out. 2022.

BELÉM, Theodoro Azevedo. **SOLDAGEM DOS METAIS: tensões e deformações em soldagem**. In: BELÉM, Theodoro Azevedo. **SOLDAGEM DOS METAIS: tensões e deformações em soldagem**. São Paulo: Centro Universitário Plínio Leite, 2006. p. 82-94. Disponível em: <https://docplayer.com.br/17055334-Soldagem-dos-metais-capitulo-11-tensoes-e-deformacoes-em-soldagem.html>. Acesso em: 12 ago. 2022.

CARVALHO, Renato. **Em FEA, o que é análise linear e não linear?** 2022. Disponível em: <https://lureengenharia.com.br/2022/04/14/analise-linear-e-nao-linear/>. Acesso em: 27 dez. 2022.

COSTA, Ubirajara. **Tudo o que você precisa saber sobre o processo de soldagem MIG/MAG**: saiba como tudo sobre o processo de soldagem mig/mag e entenda como tirar o melhor resultado possível desse processo. Saiba como tudo sobre o processo de soldagem MIG/MAG e entenda como tirar o melhor resultado possível desse processo. Disponível em: https://more.ufsc.br/homepage/inserir_homepage. Acesso em: 10 out. 2022.

DENG, D.; MURAKAWA, H.; LIANG, W. **Numerical and experimental investigations on welding residual stress in multi-pass butt-welded austenitic stainless steel pipe**. Computational Materials Science, 2008.

DHATT, G.; LEFRANÇOIS, E.; TOUZOT, G. Finite element method. [S.l.]: John Wiley & Sons, 2012.

EAGAR, Thomas; MAZZEO, Aaron. Welding Process Fundamentals. In: LIENERT, T; SIEWERT, T; BABU, S.; ACOFF, V (ed.). ASM Handbook: welding, brazing and soldering. Materials Park, Oh: Asm, 1993. p. 30-34.

GABRIEL, Gustavo Teodoro; CAMPOS, Afonso Teberga; TORRES, Alexandre Fonseca; MARTINS, Paula Carneiro. **VALIDAÇÃO DE MODELO DE SIMULAÇÃO POR MEIO DE QUATRO PARÂMETROS: ESTUDO DE UMA LINHA DE MONTAGEM CONTROLADA.** 2018. Disponível em: https://abepro.org.br/biblioteca/TN_STO_263_512_35550.pdf. Acesso em: 24 jan. 2023.

GALERA, Vinícius. **Agronegócio ganha espaço no PIB brasileiro.** 2021. Disponível em: <https://summitagro.estadao.com.br/canal-agro/especiais/agronegocio-ganha-espaco-no-pib-brasileiro/>. Acesso em: 12 nov. 2022.

Goldak, J.A. and Akhlaghi, M. (2005) Computational Welding Mechanics. Springer Science & Business Media, New York.

GONÇALVEZ JUNIOR, Milton Alves. **UMA FORMULAÇÃO ESTÁVEL DE ELEMENTOS FINITOS COM PRECISÃO TEMPORAL DE 2ª ORDEM PARA SIMULAÇÃO DE ESCOAMENTOS INCOMPRESSÍVEIS.** 2011. 114 f. Tese (Doutorado) - Curso de Engenharia Civil, Coppe, Programa de Engenharia Civil, Universidade Federal do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, 2011. Disponível em: http://objdig.ufrj.br/60/teses/coppe_d/MiltonAlvesGoncalvesJunior.pdf. Acesso em: 10 dez. 2022.

KOU, Sindo. **WELDING METALLURGY.** 2. ed. Hoboken, New Jersey: John Wiley & Sons, Inc, 2002.

LTDA., Tox® Pressotechnik do Brasil. **Cilindro Hidropneumático-TOX® RZ.** Disponível em: https://br.tox-pressotechnik.com/produtos/acionamentos/acionamentos-hidropneumaticos/cilindro-hidropneumatico-toxr-tipo-rz/#a_um. Acesso em: 26 nov. 2022.

MACHADO, Ivan Guerra. **Condução do Calor na Soldagem: Fundamentos & Aplicações.** Porto Alegre: Imprensa Livre, 2000. 128 p. Disponível em: <https://www.lume.ufrgs.br/bitstream/handle/10183/213605/001118059.pdf?sequence=1>. Acesso em: 14 out. 2022.

MANSUR, Tanius Rodrigues; ATANAZIO FILHO, Nelson do N.; GOMES, Paulo de Tarso Vida; RABELLO, Emerson Giovani; SILVA, Luiz Leite da; SCORALICK, Geraldo Antônio; SANTOS, Mariana Coelho de Vasconcelos;

BRACARENSE, Alexandre Queiroz. Estudo das tensões residuais em juntas soldadas de materiais dissimilares e determinação dos limites de resistência à fadiga dos metais de base. **Soldagem & Inspeção**, São Paulo, v. 16, n. 3, p. 274-284, set. 2011. FapUNIFESP (SciELO). <http://dx.doi.org/10.1590/s0104-92242011000300009>. Disponível em: <https://www.scielo.br/j/si/a/5wDpqj7JYG65VqrqSYH3pFN/?format=pdf&lang=pt>. Acesso em: 10 jul. 2022.

MASUBUCHI, K. *Analysis of Welded Structures*. [S.l.]: Pergamon Press, 1980.

BRACARENSE, Paulo Villani Marques Paulo J. Modenesi Alexandre Queiroz. **SOLDAGEM – Fundamentos e Tecnologia**. 3. ed. Minas Gerais: Editora Ufmg, 2009. 363 p.

OWEN, S.J., A survey of unstructured mesh generation technology, in: Proc. 7th Internat. Meshing Roundtable, Dearborn, MI, USA, October 1998.

POWERMIG. **TM-1800**. Disponível em: <https://powermig.com.br/soldagem-robotizada/robos/tm-1800/>. Acesso em: 14 out. 2022.

RODRIGUES, C. E. A. L. **Dynamic and cinematic evaluation of MIG/MAG metal transfer**. 2007. 150 f. Ph.-D. Dissertation, Federal University of Uberlandia. Uberlandia.

SCOTTI, A.; PONOMAREV, V. **Soldagem MIG /MAG: melhor entendimento, melhor desempenho**, Editora Artliber, São Paulo, 2008.

SCOTTI, Américo. **Soldagem MIG/MAG**. Minas Gerais: Artliber, 2008. 284 p

SOUZA, Remo Magalhães de. **O Método dos Elementos Finitos Aplicado ao Problema de Condução de Calor**. 2003. Disponível em: Acesso em: 03 mar. 2015.

WAINER, Emilio e BRANDI, Sérgio Duarte e MELLO, Fabio Decourt Homem de. **Soldagem: processos e metalurgia**. São Paulo: Edgar Blucher. Acesso em: 31 out. 2022. , 1992.

ANEXO

ANEXO A – Certificados de qualidade de materiais que compõem os perfis estruturais Stara S.A

ARCELORMITTAL BRASIL S.A.		Certificado de Qualidade / Mill Sheet / Quality Certificate					Folha 1 de 01											
Unidade / Plant: ArcelorMittal Tubarão		Ordem de Venda / Order No:	Nº do pedido de compra / Buyer Ref. No:	Nº pedido de recebimento / Customer Ref. No:	Nº do certificado / Certificate	Data de emissão / Issue Date:												
Rua: Brigadeiro Eduardo Gomes, 526, Pólo Industrial Tubarão, 8919-403, CEP 39150-804, CMPJ: 17.483.791/0154-02, Telefone: (51) 3248-3248/3248-3239 Fax: (51) 3248-3483/3248-3271		8890078 / 000014	5000-0108		003997400701	28.01.2021												
Cliente Final / End user:		STARA S.A. - INDUSTRIA DE BIPLEMENT			STARA S.A. - INDUSTRIA DE BIPLEMENT													
Produto / Product:		Bobina Laminada a Quente / Hot Rolled Coil			Norma de Produto / Product Standard:		Part Number:											
SABONETES AGRICOLAS, BOSON, 8 FIBREX, - FIBRAS INTERMAS MARCA LURAL, SÓDIO ÁCIDO SULFONADO, SÓDIO FOSFATO					SAE J403 1013		CONFORME NORMA											
Espessura / Thickness (MM):		Largura / Width (MM):		Barra / Edge:	Tipo de laminado / Type of laminates:	Superfície / Surface Aspect:	Cont. Especial / Special Cont.:											
0,90		1.200		Natural	Nominal	Não/No	X											
							NORMAL											
Composição Química / Chemical Composition (%) - L = Análise de Produto / Lote Analysis - P = Análise de Produto / Product Analysis																		
Quilates	Coef.	C	Si	Mn	P	S	Al	Ni	Cr	Mo	V	B	N	H	Cu	Ca	ST	
0,0005	L	0,11	0,024	0,498	0,017	0,0059	0,002	0,006	0,001	0,018	0,001	0,0005	0,0008	0,002	0,0018	0,001	0,001	0,0001

Nº de amostra / Sample No.	Tamanho / Size		Tratamento / Treatment		Dilatação / Expansion	Dureza / Hardness	Estr. / Str.	Propriedades / Properties				DWT / DWT				T. Queda / Drop		Inclinação / Inclination	Anisotropia / Anisotropy	Resistência ao Furo / Hole Expansion
	Comprimento / Length	Largura / Width	Temperatura / Temperature	Tempo / Time				Temperatura / Temperature	Tempo / Time											
01	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100	

Nome do teste / Test Name	Nº do teste / Test No.	Plano de teste / Test Plan	Quilates / Weight	Composição / Composition	Amostra 1 / Sample 1	Amostra 2 / Sample 2	Amostra 3 / Sample 3	Observações / Remarks
01	00000001	01.01	000010	0000	01	01	01	01

André Carvalho Prado
 Gerente de Assistência Técnica a Clientes
 Customer Technical Support Manager



CERTIFICADO DE QUALIDADE DAGAN - Nº 38635

Data 03/03/2021
Hora 16:28

Table with 4 columns: CLIENTE, Nº NOTA FISCAL, DATA EMISSÃO, Nº PEDIDO. Values: STARA S/A INDUSTRIA DE IMPLEMENTOS AGRICOLAS, 19509, 03/03/2021, 4500639750

Main technical specification table with columns: Descrição do Item, Peças, Pesos (Kg), Aspectos Dimensionais, Visual, Corrida, Ensaio Mecânico, Ensaio Químico, and Outros ensaios.

"Certificado gerado eletronicamente, válido sem assinatura"

Departamento de Controle de Qualidade

DEPARTAMENTO DE CONTROLE DE QUALIDADE - ISO 9001:2015

DAGAN IND. COM. DE PROD. SID. LTDA - Av. Joao Bassi, 524 - JD. Presidente Dutra - Guarulhos/SP - CEP: 07174-460 Tel: (11) 2088-7810
Site: www.dagan.com.br - E-mail: qualidade@dagan.com.br - Os certificados originais encontram-se arquivados na Dagan Ind. Com. de Prod. Sid. Ltda.

Página 1

ARCELORMITTAL BRASIL S.A. Certificate of Quality / Mill Sheet / Quality. Includes fields for Order No, Customer, Product, and Chemical Composition table.

Table with mechanical and physical test results including Yield Strength, Tensile Strength, Elongation, and Charpy impact.

Table with inspection and control details including lot numbers, weights, and inspection dates.

André Carvalho Prado
Gerente de Assistência Técnica e Clientes
Customer Technical Support Manager

