

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

**GUSTAVO TITELLO ORLANDI**

**TRABALHO DE CONCLUSÃO DE CURSO  
Robôs Flexíveis na Indústria: Uma Abordagem para a Inspeção de  
Soldagem em Tubos**

**Ibirubá  
2023**

GUSTAVO TITELLO ORLANDI

TRABALHO DE CONCLUSÃO DE CURSO

Robôs Flexíveis na Indústria: Uma Abordagem para a Inspeção de  
Soldagem em Tubos

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 mecânico e soldagem

Orientador: Cristiano Kulman, Dr. Eng.

Ibirubá

2023

ORLANDI, Gustavo Titello

Robôs Flexíveis na Indústria: Uma Abordagem para a Inspeção de Soldagem em Tubos. / Gustavo Titello Orlandi, 2023.

Orientador: Dr. Eng. Cristiano Kulman

54 Páginas, ilustrado.

Trabalho de Conclusão de Curso (Graduação) - Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia do Rio Grande do Sul, Campus Ibirubá, Curso de Graduação em Engenharia Mecânica, Ibirubá, 2023.

Inclui referências.

1. Engenharia Mecânica. 2. Soldagem. 3. Sistemas Hidráulicos e pneumáticos.

Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia do Rio Grande do Sul, Campus Ibirubá.

Engenharia Mecânica.

Robôs Flexíveis na Indústria: Uma Abordagem para a Inspeção de  
Soldagem em Tubos

**Gustavo Titello Orlandi**

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, 06 de dezembro de 2023.

Banca Examinadora:

Prof. (orientador): Cristiano Kulman, Dr. Eng.  
IFRS campus Ibirubá

Prof. Rafael Scapini, Dr. Eng.  
Instituição: IFRS campus Ibirubá

Prof. Alexandre B. de Sá, Dr. Eng.  
Instituição: IFRS campus Ibirubá

## **AGRADECIMENTOS**

Primeiramente, desejo expressar minha profunda gratidão a Deus por todas as oportunidades e momentos que ele proporcionou em minha jornada. Também quero dedicar um sincero agradecimento à minha amada família, com destaque para meu pai, minha mãe e meus avós. Seu apoio inabalável ao longo da minha jornada na faculdade foi fundamental para as minhas conquistas. Suas palavras de incentivo constante iluminaram meu caminho nas exigentes demandas acadêmicas.

À minha querida namorada, Eduarda, quero transmitir minha enorme gratidão. Sua presença constante e apoio incondicional foram como uma luz em meio aos desafios da vida.

Não posso deixar de mencionar meus amigos, aqueles que Ibirubá me proporcionou. Compartilhamos risadas, superamos desafios e vivemos momentos inesquecíveis juntos. Tenho plena consciência de que, sem a amizade de vocês, minha trajetória teria sido muito mais árdua.

Aos professores que cruzaram o meu caminho durante essa jornada, principalmente ao meu orientador Cristiano. A todos que me ajudaram com palavras de incentivo, ajuda acadêmica ou gestos de amizade, quero expressar meu sincero agradecimento. Cada um de vocês contribuiu de maneira significativa para o meu sucesso.

*do autor*

## RESUMO

Dificuldades na inspeção de soldas nas partes internas de tubos de peças automotivas geraram a motivação necessária para desenvolver uma ferramenta para tornar possível essa inspeção, aliado a um projeto de robôs flexíveis foi introduzida uma abordagem para a inspeção de tubos. O presente trabalho traz o desenvolvimento de um projeto de um robô pneumático para a inspeção da parte interna de tubos soldados, o principal objetivo é desenvolver um protótipo, ver como ele pode contribuir para essa inspeção visual, entender sobre a inspeção de solda e como efetivar essa inspeção, testar o protótipo em situações reais e entender como funciona o empreendedorismo e as visões do cliente final. O pesquisador também traz em sua metodologia referências e observações necessárias para a correta compreensão sobre o funcionamento do robô, sobre como pode ser feita a inspeção de solda e além disso, nos conta sobre um desafio de empreendedorismo onde participou com o objetivo de compreender como é possível a venda e utilização do protótipo.

**Palavras chave:** Robô pneumático; inspeção de solda; teste de solda; método inovador.

## ABSTRACT

Difficulties in inspecting welds on the internal parts of automotive parts tubes meant that the author had the necessary motivation to develop a tool to make this inspection possible. Together with a flexible robot project, an approach for tube inspection was introduced. The following work involves the development of a pneumatic robot project for inspecting the internal part of welded tubes, the main objective is to develop a prototype, see how it can contribute to this visual inspection, understand weld inspection and how to carry out this inspection, test the prototype in real situations and understand how entrepreneurship works and the views of the end client. The author also brings in his methodology references and observations necessary for a correct understanding of how the robot works, and how welding inspection can be carried out, in addition, he tells us about an entrepreneurship challenge in which he participated to understand what it is like. the sale and use of the prototype is possible. The robot's tests showed satisfactory inspection results, but needed improvements in relation to its inflatable body. Considering this, this new method of approach is effective and can be used as a low-cost tool for the inspection of internal welds.

**Key words:** Pneumatic robot; welding inspection; welding test; innovative method.

## LISTA DE FIGURAS

<b>Figura 1-Exemplo teórico de solda.</b>	16
<b>Figura 2 - Patente processo de soldagem.</b>	17
<b>Figura 3 - Evolução dos processos de soldagem.</b>	18
<b>Figura 4 - Trinca a frio.</b>	20
<b>Figura 5 - Fusão incompleta</b>	20
<b>Figura 6 - Penetração incompleta</b>	21
<b>Figura 7 - Porosidade.</b>	21
<b>Figura 8 - Mordedura.</b>	22
<b>Figura 9 - Ensaio de tração.</b>	23
<b>Figura 10 - Ensaio de impacto.</b>	23
<b>Figura 11 - Ensaio de dobramento.</b>	234
<b>Figura 12 - Macrografia.</b>	24
<b>Figura 13 - Procedimento de inspeção visual.</b>	25
<b>Figura 14 - Ensaio líquido penetrante.</b>	25
<b>Figura 15 - Teste de estanqueidade.</b>	26
<b>Figura 16 - Método de soldagem TIG.</b>	27
<b>Figura 17 - Método de soldagem MIG/MAG.</b>	27
<b>Figura 18 - Compressão do ar.</b>	29
<b>Figura 19 - Princípio de pascal.</b>	30
<b>Figura 20 - Matriz morfológica.</b>	32
<b>Figura 21 - Carretel e suporte feito por meio de impressora 3D</b>	34
<b>Figura 22 - Solda do tubo flexível.</b>	35
<b>Figura 23 - Montagem teste Eixo no carretel</b>	35
<b>Figura 24 - Início da montagem.</b>	36
<b>Figura 25 - Montagem do corpo do robô, com cabo para amarração da câmera.</b>	36
<b>Figura 26 - Controlador direcional.</b>	36
<b>Figura 27 - Corpo finalizado, com tubo flexível inflado e câmera presa.</b>	37
<b>Figura 28 - Corpos de prova antes da solda, identificados.</b>	38
<b>Figura 29 - Corpos de prova soldados para o teste.</b>	38
<b>Figura 30 - Canvas propostas de valor.</b>	40
<b>Figura 31 - Canvas modelo de negócios.</b>	40
<b>Figura 32 - Validação de protótipo.</b>	41



<b>Figura 33 - Protótipo inicial desenvolvido para o desafio.</b>	42
<b>Figura 34 - Teste protótipo inicial desenvolvido para o desafio.</b>	42
<b>Figura 35 - Foto 1 do teste no corpo de prova 1 (junção contínua de tubo).</b>	43
<b>Figura 36 - Foto 2 do teste no corpo de prova 1 (junção contínua de tubo).</b>	44
<b>Figura 37 - Foto 1 do teste no corpo de prova 2 (linha de fechamento).</b>	44
<b>Figura 38 - Foto 2 do teste no corpo de prova 2 (linha de fechamento).</b>	45
<b>Figura 39 - Foto 1 do teste no corpo de prova 3 (linha de fechamento com costura).</b>	45
<b>Figura 40 - Foto 2 do teste no corpo de prova 3 (linha de fechamento com costura).</b>	46
<b>Figura 41 - Foto 1 do teste no corpo de prova 4 (junção em “T”).</b>	46
<b>Figura 42 - Foto 2 do teste no corpo de prova 4 (junção em “T”).</b>	47
<b>Figura 43 - Foto 1 do teste no corpo de prova 5 (junção em “L”).</b>	47
<b>Figura 44 - Foto 2 do teste no corpo de prova 5 (junção em “L”).</b>	48
<b>Figura 45 - Foto 1 do teste no corpo de prova 6 (junção em grau).</b>	48
<b>Figura 46 - Foto 2 do teste no corpo de prova 6 (junção em grau).</b>	49
<b>Figura 47 - Robô pneumático durante os testes.</b>	49
<b>Figura 48 - Robô pneumático durante os testes.</b>	50
<b>Figura 49 - Defeitos causados no robô devido a rebarbas.</b>	51

## SUMÁRIO

<b>1 INTRODUÇÃO</b>	<b>12</b>
1.1 JUSTIFICATIVA	13
1.2 OBJETIVOS	14
<b>1.2.1 Objetivos específicos</b>	<b>14</b>
<b>2 REFERENCIAL TEÓRICO</b>	<b>15</b>
2.1 O processo de soldagem	15
2.1.1 Formação de uma junta soldada	16
2.1.2 História da soldagem	17
2.1.3 Descontinuidade de solda	19
2.1.4 Métodos de inspeção de soldagem	22
2.1.5 Tipos de soldagem	27
2.2 Robô de inspeção	28
2.3 Pneumática	29
2.3.1 Princípio de pascal	30
2.4 Matriz morfológica	31
<b>3 MATERIAIS E MÉTODOS</b>	<b>32</b>
3.1 Metodologia	32
3.2 Materiais utilizados	34
3.3 Montagem do projeto	35
3.4 Teste de validação	38
<b>4 DESAFIO EM EMPREENDEDORISMO</b>	<b>40</b>
<b>5 RESULTADOS E DISCUSSÃO</b>	<b>44</b>
5.1 Resultados do teste de validação	44
<b>6 CONCLUSÕES E SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS</b>	<b>50</b>
<b>7 REFERÊNCIAS</b>	<b>51</b>

## 1 INTRODUÇÃO

Nos tempos atuais, a soldagem se destaca como um dos processos mais utilizados na indústria, possibilitando a união de elementos diversos, como tubos, barras e chapas. Contudo, assim como em todo processo fabril, a soldagem está suscetível a falhas, tornando a inspeção pós-execução uma etapa crucial. A complexidade na inspeção de partes internas de tubos apresenta um desafio intrigante: como realizar inspeções eficazes nessas áreas de difícil acesso?

Nesse cenário, o avanço tecnológico e a ascensão da indústria 4.0 trouxeram consigo uma crescente presença de robôs em diversos setores, incluindo na parte de inspeção. É nesse contexto que o autor optou por empregar a tecnologia como aliada na inspeção de soldas em locais de difícil acesso.

O propósito deste trabalho é explorar de quais maneiras o robô amorfo pode efetivamente auxiliar na inspeção de soldagem em tubos. Para tal, será exposto e examinado tanto o funcionamento do processo de inspeção de soldas quanto a relevância da inspeção visual. Pretende-se demonstrar como essa abordagem tecnológica pode contribuir para a indústria, resultando em soldas de qualidade superior. Para avaliar a eficácia desse método de inspeção, foi proposto aprimorar um protótipo de robô amorfo já existente em na instituição de ensino. Onde se planejou adaptá-lo para as necessidades, incorporando câmeras e luzes que garantam uma visualização precisa dos locais de soldagem. A condução de testes laboratoriais permitirá uma avaliação dos resultados obtidos, contribuindo para conclusões e análises.

Além de se dedicar ao desenvolvimento do projeto, à prototipagem e aos testes, o autor também participou de um desafio voltado para o empreendedorismo. Nessa experiência, ele adquiriu valiosos insights sobre como adaptar o seu produto às necessidades do cliente final, estratégias eficazes de comercialização e identificação da solução.

A junção entre o empreendedorismo, a tecnologia e a engenharia no contexto da inspeção de soldagem apresentam um grande potencial. Por meio deste estudo, almeja-se melhorar a qualidade das soldas e buscar soluções para a inspeção interna.

### 1.1 JUSTIFICATIVA

O profundo interesse pelo tema da busca por melhorias na performance dos componentes automotivos é refletido no percurso acadêmico e pessoal do autor. Nesse

contexto, a otimização das tecnologias e o desenvolvimento de peças visando aumentar a potência dos motores têm sido áreas de foco fundamentais. Através desse olhar apaixonado pela preparação automotiva, o autor percebeu que um dos aspectos cruciais para se atingir a máxima performance reside no eficiente fluxo de gases de escapamento em carros de motor aspirado. A inspeção visual de peças relacionadas ao fluxo de gases de escapamento revelou, em alguns casos, que a soldagem dos tubos do coletor de escapamento invadia a parte interna dos tubos. Essa constatação levantou preocupações significativas quanto à possível perda de potência ocasionada por essa irregularidade. A avaliação da parte interna dos tubos, no entanto, enfrenta desafios devido à estreita bitola dos tubos e à complexidade das curvas presentes.

Esses desafios não se restringem apenas ao setor automotivo, mas estendem-se a outras áreas das indústrias, como a de máquinas agrícolas, onde as peças frequentemente apresentam tubos de grandes comprimentos. Nessas situações, a inspeção visual das partes internas dos tubos torna-se praticamente inviável devido às limitações de acesso e à natureza da estrutura. Diante dessas complexidades, encontrou-se a inspiração em um projeto que foi desenvolvido na instituição de ensino focado na criação de um robô flexível para a passagem de fios e inspeção de tubos. Essa abordagem inovadora despertou a atenção para uma possível aplicação desse robô na inspeção interna de soldas em tubos. O uso desse robô amorfo oferece uma solução promissora para a detecção do problema identificado anteriormente, permitindo a inspeção detalhada de pontos de difícil acesso nos tubos.

Como resultado, o projeto tem como objetivo central explorar a viabilidade e a eficácia do uso do robô amorfo na inspeção visual e verificação das soldagens internas em tubos, abrangendo tanto o contexto automotivo quanto a indústria de máquinas agrícolas. Por meio dessa abordagem inovadora, a intenção é contribuir significativamente para a melhoria da performance de peças, confiabilidade e segurança desses componentes.

## 1.2 OBJETIVOS

Analisar a contribuição de um robô amorfo para a inspeção de soldagem em tubos.

### 1.2.1 Objetivos específicos

- Descrever e entender as principais tecnologias para a análise e inspeção de solda;
- Desenvolver um protótipo de um robô amorfo para a inspeção visual da solda em tubos;
- Avaliar a eficácia da inspeção em cenários reais;
- Entender a importância do empreendedorismo e visões do cliente.

## 2 REFERENCIAL TEÓRICO

Neste capítulo, o autor apresentou o embasamento teórico fundamental para compreender e contextualizar o trabalho. Discutiu sobre o processo de soldagem, como é feita a sua inspeção, analisou-se o papel dos robôs na indústria e forneceu uma introdução à pneumática, que desempenha um papel crucial como sistema propulsor do robô pneumático. Além disso, o autor apresenta um capítulo citando sobre como usou a matriz morfológica para definir as opções de componentes do projeto.

### 2.1 O PROCESSO DE SOLDAGEM

Conforme Paulo Marques destaca, a soldagem é "processo de união de materiais baseado no estabelecimento de forças de ligação química de natureza similar às atuantes no interior dos próprios materiais, na região de ligação entre os materiais que estão sendo unidos" (Marques, 2011, p. 19). Esse processo fundamental desempenha um papel crucial na fabricação e construção, permitindo a união de materiais de forma eficaz.

Segundo Marques (2011) a soldagem é um método de união, oferece uma alternativa versátil e robusta para unir materiais, essa técnica envolve a aplicação de calor intenso, capaz de elevar a temperatura dos materiais a um ponto onde ocorre a fusão. Uma vez fundidos parcial ou completamente, as bordas das peças são combinadas e, ao esfriar e solidificar, formam uma única.

Dentre os diversos métodos de soldagem existentes, o enfoque deste trabalho cai sobre o processo de soldagem por fusão, devido à sua relevância e aplicabilidade. Nesse processo, o calor necessário para induzir a fusão pode ser gerado de várias maneiras, incluindo o uso de arcos elétricos, feixes de laser ou até mesmo através da aplicação de atrito (Felizardo, 2016). Esses métodos aquecem o material a tal ponto que suas moléculas entram em um estado fundido, permitindo que ocorra a fusão. A soldagem por fusão desempenha um papel vital em várias indústrias, como a automotiva, aeroespacial e de construção naval. A capacidade de unir materiais dissimilares, bem como proporcionar alta resistência estrutural, torna esse processo um pilar na fabricação de produtos essenciais para o cotidiano.

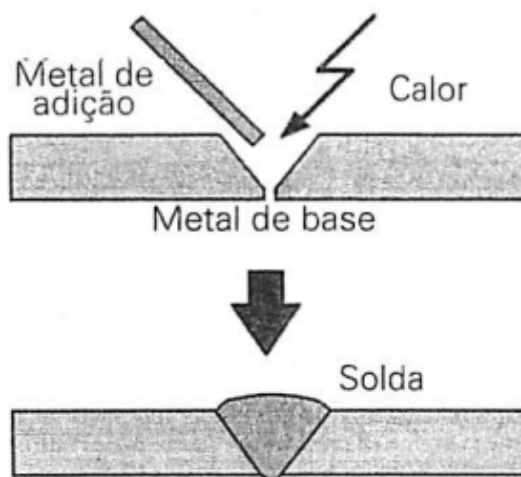
#### 2.1.1 Formação de uma junta soldada

Uma peça metálica pode ser simplificada considerada como um conjunto de átomos organizados em uma estrutura. Inicialmente, esses átomos estão dispostos com uma

energia relativamente baixa e mantêm uma distância entre si. No entanto, quando submetidos ao calor, ocorre um aumento na energia cinética dos átomos, resultando em maior agitação e vibração. Essa elevação de energia promove uma maior mobilidade dos átomos, permitindo que eles se movam mais livremente e, conseqüentemente, se aproximem. Com a aplicação de calor, os átomos na superfície da peça têm a oportunidade de se ligarem entre si (Marques, 2011).

O resultado dessa combinação entre o aumento de energia térmica e a pressão aplicada, supera a força de repulsão elétrica que normalmente impedia a aproximação dos átomos. E faz com que as peças se fundem gradualmente em uma nova estrutura. À medida que o processo de soldagem avança e as peças unidas começam a resfriar, a energia térmica diminui, e os átomos retomam suas posições mais estáveis. Enquanto isso acontece, eles estabelecem ligações metálicas mais fortes entre si, resultando em uma junção sólida entre as peças. Esse fenômeno é o que nos dá as conexões duráveis nos produtos soldados, criando assim uma junta soldada.

**Figura 1-Exemplo teórico de solda.**



Fonte: Marques, 2011.

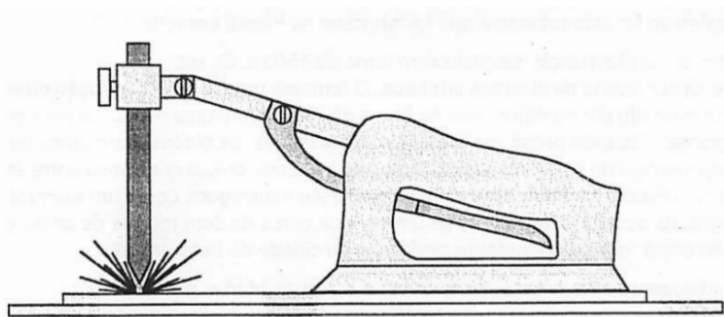
### **2.1.2 História da soldagem**

O processo de soldagem tem passado por contínuos aprimoramentos desde os primórdios da civilização. Por volta de 1500, na Idade Média, começaram a surgir evoluções nas técnicas de soldagem, que na época, eram focadas principalmente na união de metais através de martelamento. Essa abordagem era utilizada para produzir objetos cortantes e

armas. No entanto, com o advento da fundição de metais e a criação do alto forno, o processo de soldagem tornou-se um processo secundário.

O século 18 trouxe um marco significativo devido à Revolução Industrial e às descobertas científicas. Humphrey Davy foi responsável pela descoberta do arco elétrico, e logo após, Edmund Davy introduziu o acetileno, ambos possibilitando o surgimento de novos métodos de soldagem por fusão. Em 1885, a primeira patente para um processo de soldagem foi registrada, na qual um eletrodo de carvão fundia uma peça usando o arco elétrico.

**Figura 2 - Patente processo de soldagem.**



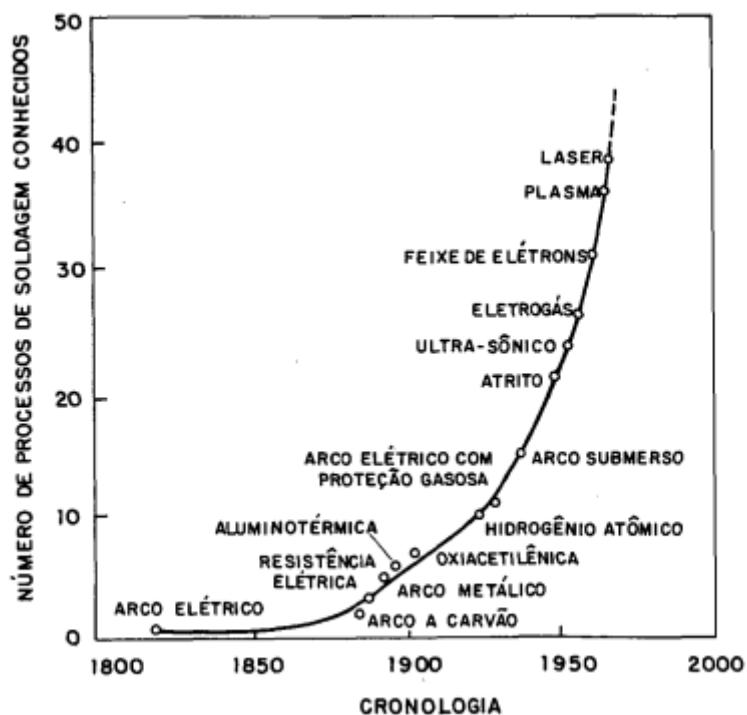
Fonte: Moraes (2021).

Posteriormente, várias evoluções ocorreram. Em 1907, o processo de soldagem a arco com um eletrodo revestido foi patenteado, e esse revestimento foi usado para estabilizar o arco. Esse processo, após alguns desenvolvimentos, tornou-se o método mais amplamente utilizado no mundo.

A Primeira Guerra Mundial teve um papel estratégico crucial no avanço da soldagem. A necessidade de produzir equipamentos militares impulsionou o desenvolvimento de técnicas de soldagem mais avançadas e o uso de ligas especiais. Esse período acelerou a evolução tecnológica da soldagem e sua aplicação em diversas áreas. Conforme o século XX progrediu, a soldagem continuou a evoluir. Técnicas como a soldagem a arco elétrico e a soldagem a gás ganharam destaque. Além disso, a criação de novos materiais e ligas metálicas impulsionou a demanda por métodos de soldagem mais sofisticados e precisos.



**Figura 3 - Evolução dos processos de soldagem.**



Fonte: Wainer (1998).

Atualmente, a soldagem é uma parte indispensável de várias indústrias, desde a automotiva e aeroespacial até a construção e a manufatura. Além das técnicas tradicionais, métodos modernos, como a soldagem a laser e a soldagem por feixe de elétrons, revolucionaram a capacidade de unir metais de maneira precisa e eficiente, impulsionando ainda mais o progresso tecnológico.

### 2.1.3 Descontinuidade de solda

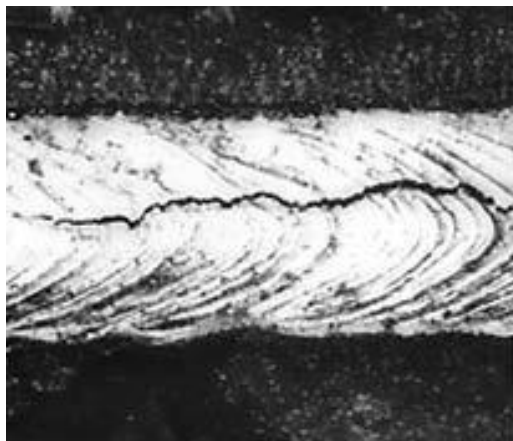
Conforme destacou Bruno Domingues, (2020) "Nenhum material de construção nem nenhuma estrutura de engenharia é isenta de imperfeições." Essa afirmação se confirma no contexto da soldagem, onde os cordões de solda estão suscetíveis a variados fatores que exercem influência direta sobre a qualidade da fusão entre os materiais. Dentro desse complexo cenário, elementos como o tamanho da peça a ser soldada, a localização da junta de solda e as variações de material surgem como variáveis críticas. Esses fatores, quando

negligenciados ou não controlados devidamente, podem comprometer a integridade da solda, resultando na ocorrência de defeitos indesejados durante o processo de soldagem.

É crucial ressaltar que muitas das imperfeições nas soldas podem passar despercebidas, a menos que sejam analisadas por profissionais qualificados. Essa abordagem é fundamental para garantir um bom desempenho das soldas e evitar problemas. A inspeção adequada das linhas de soldagem é uma etapa crítica nesse processo, permitindo verificar problemas importantes como:

- Contaminação por gases: Se o gás de proteção não for completamente inerte ou não proporcionar proteção adequada, o oxigênio e o nitrogênio presentes na atmosfera podem ser absorvidos pelo material da solda. Isso pode levar à formação de óxidos e nitretos que, como resultado, podem diminuir a resistência mecânica do cordão de solda.
- Trincas a frio: São rachaduras que ocorrem em temperaturas ambiente ou abaixo delas e são um desafio comum na soldagem devido a vários fatores como presença de martensita, dissolução de hidrogênio e tensões internas. A formação de martensita é um fator que influencia a temperabilidade do aço, e se esse processo não for adequadamente controlado, pode resultar na acumulação de tensões internas que, por sua vez, aumentam a susceptibilidade à formação de trincas no material. O hidrogênio que é resultado da umidade da superfície tanto do ar como dos materiais, faz com que suas partículas penetrem e se espalhem entre os átomos do metal, que após o metal solidificar, não consegue permanecer na mesma quantidade e acaba por tentar se agrupar, esse agrupamento de moléculas de hidrogênio gera tensões internas significativas dentro do metal. Essas tensões podem enfraquecer o material, também gerando trincas.

**Figura 4 - Trinca a frio.**



Fonte: Kobelco (2023).

- Fusão incompleta: É causada por uma diminuição da corrente elétrica durante o processo de fusão.

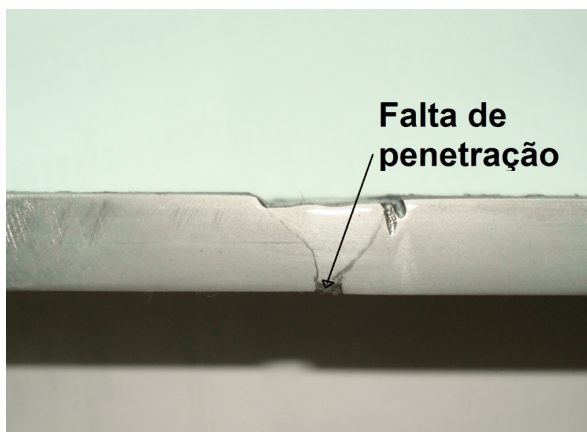
**Figura 5 - Fusão incompleta**



Fonte: Novais (2010).

- Penetração incompleta: Acontece quando o metal de adição não consegue penetrar totalmente a espessura da junta, normalmente pode ser visto na raiz da solda.

**Figura 6 - Penetração incompleta**



Fonte: Jacob (2017).

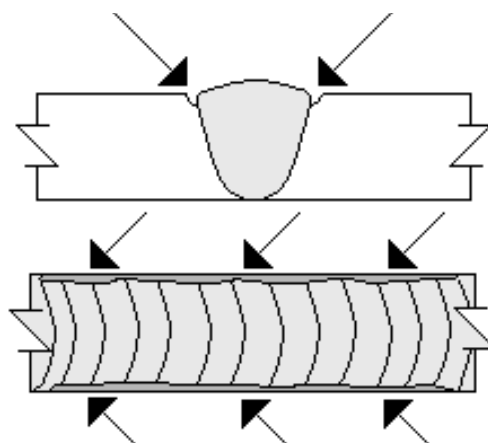
- Porosidade: Refere-se à formação de cavidades que ocorrem devido ao aprisionamento de gases durante o processo de solidificação do cordão de solda.

**Figura 7 - Porosidade.**



Fonte: Jacob (2017).

- Mordedura: As cavidades podem surgir devido a diversos fatores, como a soldagem sendo realizada muito rapidamente, o arco elétrico mantido a uma distância muito longa do metal base, o uso de um eletrodo com um diâmetro excessivamente grande ou devido à presença de umidade no eletrodo ou a corrente de soldagem (amperagem) muito alta.

**Figura 8 - Mordedura.**

Fonte: Jacob (2017).

Ao analisar os principais problemas de descontinuidade de solda, o autor observou que a maioria deles pode ser identificada por meio de inspeção visual. Isso ressalta a relevância do projeto e seu objetivo principal.

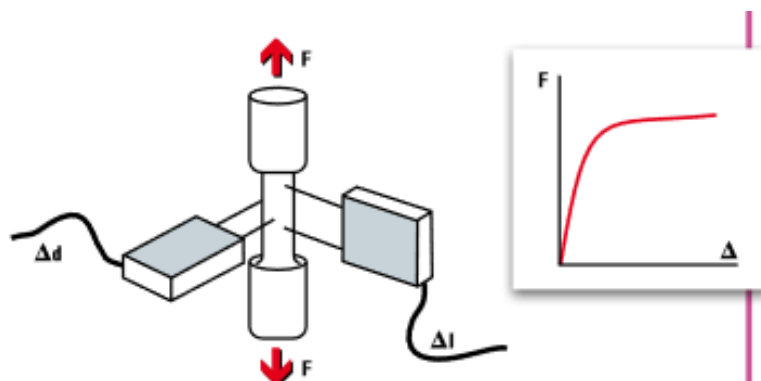
#### **2.1.4 Métodos de inspeção de soldagem**

A inspeção de soldagem é uma parte crucial do processo de fabricação e construção, pois garante a integridade das uniões de metal. Ela pode ser categorizada em dois grupos principais: ensaios destrutivos e ensaios não destrutivos. Esses métodos desempenham um papel essencial na verificação da qualidade das soldas, garantindo que elas atendam aos padrões de segurança e desempenho exigidos em uma variedade de aplicações industriais e estruturais. Abaixo cita os principais métodos de inspeção:

Métodos de inspeção por ensaios destrutivos:

Ensaio de tração: “O ensaio de tração consiste em aplicar uma força, logicamente de tração, coincidente com o eixo do corpo de prova, medindo-se simultaneamente, durante o ensaio, a força aplicada e a deformação que o material sofre, devido à ação da carga.” (SENAI, p. 287). Esta medição é feita por meio de extensômetros instalados no sentido axial da carga aplicada.

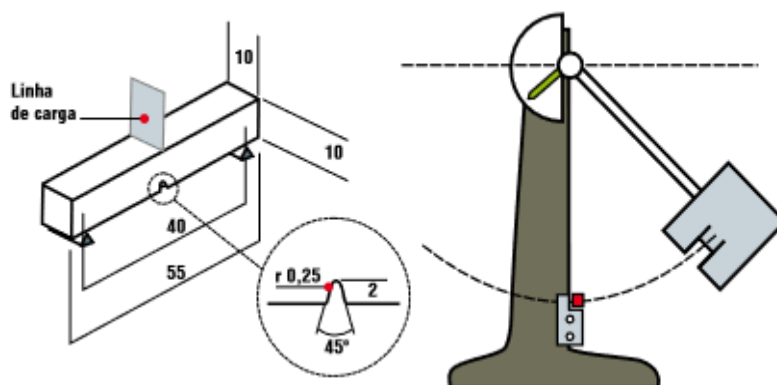
**Figura 9 - Ensaio de tração.**



Fonte: SENAI (2012).

Ensaio de impacto: É um procedimento no qual uma carga é aplicada a um material usando um pêndulo que se aproveita da força da gravidade para cair sobre a amostra. Esse impacto induz uma ruptura controlada no corpo de prova, permitindo-nos determinar a tenacidade do material. Esse teste avalia a capacidade de resistir a fraturas por meio de carga dinâmica, fornecendo informações sobre sua resistência em situações de impacto.

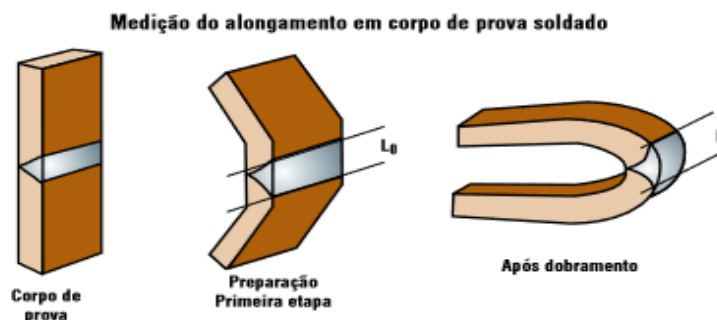
**Figura 10 - Ensaio de impacto.**



Fonte: SENAI (2012).

Ensaio de dobramento: É um procedimento que envolve a aplicação de uma força para tentar dobrar uma peça soldada. Com o objetivo de avaliar a capacidade da peça em resistir a deformações por flexão e determinar o ponto de falha. Ele fornece informações sobre as propriedades de alongamento e a resistência da peça.

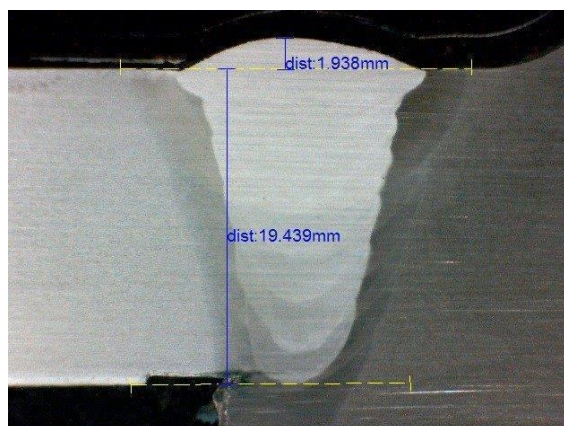
**Figura 11 - Ensaio de dobramento.**



Fonte: SENAI (2012).

Macrografia: Este teste faz a análise da aparência de uma amostra cortada em uma seção plana, que é polida e tratada com um reagente. A macrografia fornece informações gerais sobre a homogeneidade do material, penetração da solda, tamanho dos cordões.

**Figura 12 - Macrografia.**

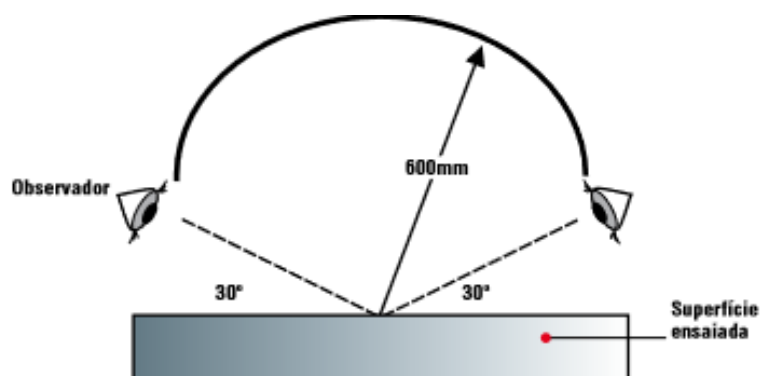


Fonte: LABTESTE.

Métodos de inspeção por ensaios não destrutivos:

Inspeção visual: Este método é crucial para o experimento, é simples, não destrutivo e de baixo custo. Ele é eficaz na detecção da maioria das discontinuidades. No ensaio direto, a inspeção deve ser realizada a uma distância máxima de 600mm da peça, com a lente ou o olho posicionado a um ângulo mínimo de 30 graus. Para o ensaio indireto, não há uma norma específica. No entanto, o inspetor deve possuir habilidades técnicas de inspeção, capacidade física para identificar discontinuidades e assegurar uma boa iluminação no local de inspeção.

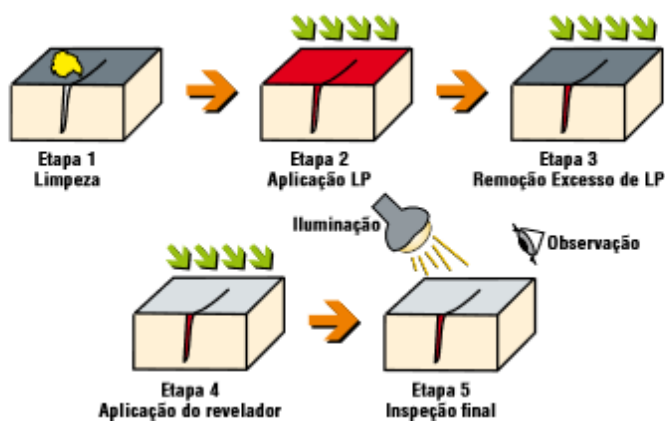
**Figura 13 - Procedimento de inspeção visual.**



Fonte: SENAI (2012).

Ensaio por líquido penetrante: é uma técnica simples em que um líquido revelador é aplicado na peça a ser examinada, o excesso é removido e, em seguida, é realizada a inspeção final. No entanto, esse método só é eficaz na detecção de descontinuidades que estejam abertas à superfície, tornando-o menos adequado para identificar imperfeições internas.

**Figura 14 - Ensaio líquido penetrante.**



Fonte: SENAI (2012).

Ensaio de estanqueidade: Tem como objetivo primordial identificar vazamentos potenciais. Ele envolve a introdução de um gás ou líquido no recipiente, aplicando uma pressão adicional e, em seguida, verifica-se a presença de vazamentos por meio da observação de bolhas ou outros indicadores, como espumas.



**Figura 15 - Teste de estanqueidade.**



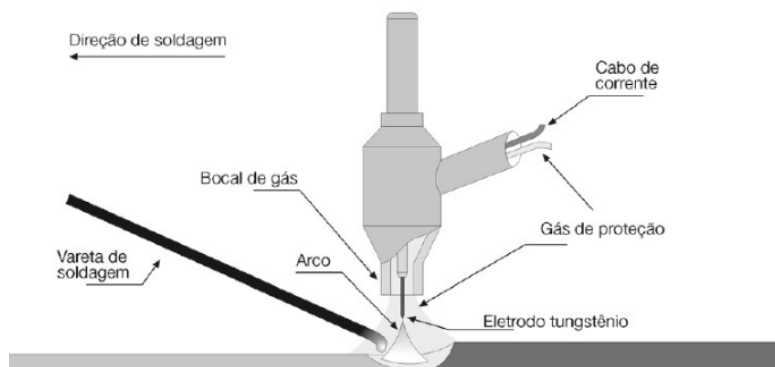
Fonte: SENAI, 2023.

Ensaio por ultrassom: “É um método não destrutivo, no qual um feixe sônico de alta frequência, entre 1MHz e 20MHz, é introduzido no material a ser inspecionado, sua principal finalidade é a detecção de descontinuidades internas, podendo ser aplicado em materiais não ferrosos, materiais metálicos ou não metálicos.” (SENAI, p. 352, 2012).

### 2.1.5 Tipos de soldagem

Segundo Cirino (2009) “O processo TIG se caracteriza por um arco voltaico estabelecido entre um eletrodo de tungstênio, dito não-consumível, e a peça a ser soldada, que em alguns casos permite a soldagem de chapas metálicas finas (abaixo de 3 mm) sem utilização de metal de adição. Um fluxo de gás inerte protege o eletrodo de tungstênio (W) e a poça de fusão da oxidação e ao ser ionizado fornece um caminho condutor (plasma) para a corrente elétrica. Este processo é capaz de produzir soldas de alta qualidade em quase todos os metais” (p.5).

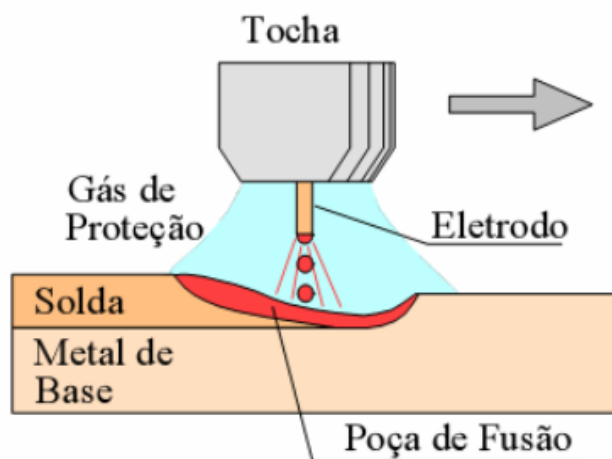
**Figura 16 - Método de soldagem TIG.**



Fonte: Cirino, 2009.

Já o processo MIG/MAG “caracteriza-se por um arco voltaico estabelecido entre um eletrodo consumível (arame-eletrodo) e a peça de trabalho. A região do arco voltaico pode ser protegida por um gás inerte (argônio ou hélio, o que é mais comum na soldagem do alumínio e suas ligas), um gás ativo (como CO<sub>2</sub>, por exemplo) ou por misturas entre estes e outros tipos de gases, sendo que o gás inerte aparece sempre em maior proporção na mistura. O arame-eletrodo, sendo alimentado continuamente, funde no calor do arco e gotas de metal líquido de algum modo são transferidas de forma intermitente para a poça de fusão e assim formam o cordão de solda” (Cirino 2009, p. 18).

**Figura 17 - Método de soldagem MIG/MAG.**



Fonte: Cirino, 2009

## 2.2 Robô de inspeção

A robotização na indústria tem evoluído rapidamente, e a era da Indústria 4.0 demonstra como essas ferramentas desempenham um papel cada vez mais vital, atendendo às necessidades e aprimorando o controle e a gestão de processos industriais. Conforme dito por RIJO (2013), “No início dos anos 60, os primeiros robôs começaram a ser usados com o objetivo de substituir o homem em tarefas perigosas ou insalubres, as quais envolviam condições desagradáveis, tipicamente com altos níveis de calor, ruídos, gases tóxicos, esforço físico extremo, trabalhos tediosos e monótonos” (p. 4). Os ambientes confinados, nos quais o acesso humano é limitado, representam um cenário interessante para a aplicação de robôs. Eles podem explorar espaços apertados e inacessíveis, destacando ainda mais a versatilidade e a importância dessa máquina na automação.

De acordo com Tronco (2017), a definição clássica de um robô industrial é “uma máquina manipuladora, com vários graus de liberdade, controlada automaticamente, reprogramável, multifuncional, que pode ter a base fixa ou móvel, para utilização em aplicações de automação industrial” (p. 2). No entanto, o robô que é apresentado no projeto difere um tanto dessa definição convencional.

Os robôs amorfos, chamam atenção por sua ausência de uma forma definida. Em vez de possuir uma estrutura fixa ou rígida, esses robôs são caracterizados por sua flexibilidade e adaptabilidade. Embora fujam à ideia tradicional de robôs industriais, não deixam de ser considerados robôs devido à sua capacidade de realizar tarefas de forma automatizada e programável. Esses robôs flexíveis são particularmente úteis em situações em que a conformação variável é necessária para interagir com ambientes complexos e objetos de formas diversas.

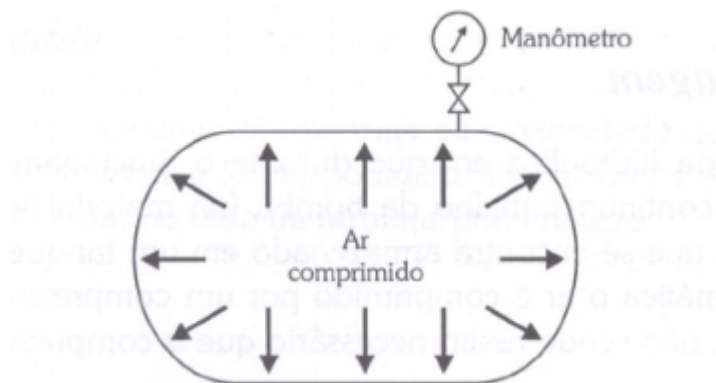
### 2.3 Pneumática

Fialho, (2009) define pneumática como “Provém da raiz grega “PNEUMA”, que significa fôlego, vento, sopro. Logo, pneumática é conceituada como sendo a matéria que trata dos movimentos e fenômenos dos gases” (p.19). Esse conceito vem à tona quando se almeja entender o funcionamento do robô inspecionador de tubos.

Para compreender adequadamente o processo da pneumática, é essencial ter um entendimento do conceito de pressão e como ela desempenha um papel fundamental nesse contexto. Conforme Fialho (2009), pressão pode ser definida como "a força exercida devido à compressão do ar em um recipiente, por unidade de área" (p.19). Essa definição leva a entender o processo pelo qual o ar, que atua como fluido de trabalho, é comprimido, gerando pressão em um ambiente fechado.

Conforme afirmado por Fialho (2009), a compressão do ar é uma etapa importante nesse processo, quando confinado a um espaço reduzido, o ar diminui seu volume, o que resulta em maior número de moléculas de ar em uma área menor. Isso faz com que seja gerado uma força que é transmitida para as paredes do recipiente. Essa força por unidade de área é o que se chama de pressão, pressão que é uma grandeza fundamental na pneumática, é o que impulsiona e controla o movimento dos componentes pneumáticos. Ela serve como base para todo o sistema pneumático, permitindo o funcionamento dos dispositivos.

**Figura 18 - Compressão do ar.**



Fonte: Fialho (2009).

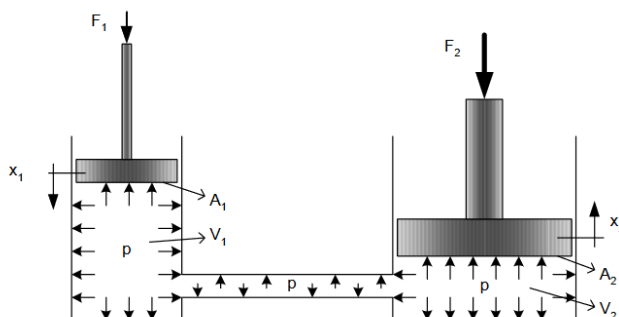
### 2.3.1 Princípio de pascal

O princípio de Pascal é de grande importância para entender o comportamento de fluidos quando estão confinados. Esse princípio diz que a pressão aplicada a uma determinada área de um fluido confinado é transmitida igualmente a todas as partes desse fluido e às áreas das paredes do recipiente. Isso também está relacionado ao princípio do multiplicador de forças. Segundo Bergamim (2007), quando uma pressão é aplicada a uma área menor, como a de um pistão menor, essa pressão é transmitida e amplificada para uma área maior, como a de um pistão maior, resultando em uma amplificação da força.

Quando o sistema estiver em equilíbrio, com os êmbolos parados a pressão se distribuirá por todo o fluido:

$$p = \frac{F_1}{A_1} = \frac{F_2}{A_2}$$

**Figura 19 - Princípio de pascal.**



Fonte: Fialho (2009).

De acordo com Fialho (2009), esse é um conceito fundamental para o funcionamento de muitas aplicações, incluindo máquinas industriais, veículos e sistemas robóticos. E também inclusive para compreensão do robô pneumático.

#### 2.4 Matriz morfológica

A tomada de decisões relacionadas a questões como a escolha de materiais, métodos de fabricação e montagem eficaz pode ser um desafio significativo. Uma ferramenta de projeto que auxilia nesse processo é a matriz morfológica, desenvolvida pelo astrônomo suíço Fritz Zwicky, onde a ideia por trás dessa matriz surgiu a partir da necessidade de organizar e visualizar problemas complexos, originalmente aplicados em sua pesquisa em astronomia.

A matriz morfológica é uma representação organizada, na qual as linhas e colunas são dedicadas aos parâmetros do problema e às possíveis soluções. Na primeira coluna, são listadas as características essenciais do problema, enquanto nas linhas subsequentes são apresentadas as diversas alternativas para resolvê-lo. Isso proporciona uma visualização clara das questões e das soluções correspondentes, simplificando o processo de seleção da abordagem mais apropriada.

### **3 MATERIAIS E MÉTODOS**

#### **3.1 Metodologia**

Neste segmento, são abordados os aspectos metodológicos da pesquisa realizada, detalhando os procedimentos relevantes para analisar a contribuição de um robô amorfo na inspeção de soldagem de tubos. O estudo tem uma natureza aplicada, empregando conhecimentos de engenharia para resolver dificuldades na inspeção de soldas na parte interna de tubos.

Com o objetivo de alcançar os propósitos estabelecidos e obter uma compreensão mais aprofundada do trabalho, foi adotada uma abordagem qualitativa. A pesquisa abrange análises do tipo descritiva, bem como exploratória.

Na primeira fase, foi conduzida uma pesquisa descritiva, na qual se mapeou a problemática na inspeção de solda, e sua dificuldade em locais de maior complexidade geométrica. Além disso, foram identificadas as necessidades práticas e técnicas que deveriam ser abordadas para melhorar esse processo.

Na segunda fase, o autor concentra a atenção em uma pesquisa exploratória com o objetivo de desenvolver um robô amorfo com movimentação pneumática. As especificações deste robô foram definidas por meio da matriz morfológica, que foi desenvolvida com o objetivo de simplificar as escolhas, essas que acabam sendo marcadas com a cor verde.

Figura 20 - Matriz morfológica.

Corpo	Opção 1	Opção 2	Opção 3	Opção 4	Decisão:
Mecanismos de propulsão do robô	Ar comprimido	motor elétrico e sistemas de rodas	mecanismo rígido como de endoscópio	Sistema rígido + ar comprimido para direcionar	Propulsão total por meio de ar comprimido, seguindo a ideia inicial do robô amorfo
Sistema de controle direcional do robô	Servo motor	Sistema com linhas de anzol manual	Câmaras de ar laterais		Simplicidade no desenvolvimento e baixo custo
Corpo do robô	Câmara única	Câmaras menores que vão enchendo sequencial	Única e com anéis		Facilidade na execução, custo e flexibilidade
Corpo do "motor"	Câmara vedada	Enrolamento manual externo			Desenrolamento interno, facilidade e melhor vedação
Vedações	Apenas cola quente	Cola quente e cola de PVC e fita adesiva	Araldite		Após análises e testes de bancada, a opção se mostrou melhor
Sistema de recuo	Elásticos presos nos anéis/junções	Natural, desinflando o sistema	Carretel para recolher o robô	Motor elétrico	Após testes de bancada se mostrou o mais efetivo
Elétrica	Opção 1	Opção 2	Opção 3	Opção 4	
Câmera	Câmera com fio ligada a um telefone	Micro câmera wifi	Micro câmera de visão noturna com fio		Micro câmera wifi nos elimina o uso de um fio de transmissão de dados, após pesquisa foi encontrada uma com um baixo custo R\$ 40.00
Controle de desenrolamento	Arduino	Gatilho	Potenciometro		Se mostrou a opção mais adequada visto o uso da parafusadeira
Movimento do carretel	Motor 12v com redução	Alavanca manual	Parafusadeira acoplada ao eixo		Disponível na instituição, fácil acesso e simples
Iluminação	1 led ligado a uma bateria	2 lâmpadas ligadas a uma bateria	Sem iluminação		Ligação simples com 2 leds, uma pilha LR41 e um interruptor pequeno

Fonte: Autor.

Analisando a matriz morfológica, chegou-se à conclusão de que o propulsor do projeto se inspiraria em uma solução da VineRobots, a qual apresenta diversos modelos de robôs pneumáticos e soluções para a construção do mesmo.

Segundo Vinerobots, (2023), “*Soft robots* (“Robôs macios”) são robôs macios e contínuos projetados com fabricação de baixo custo e para a navegação em ambientes difíceis. Ao contrário dos robôs tradicionais, que se movem através do contato com a superfície para caminhar ou correr, o robô depende do crescimento para se movimentar. Tal como uma videira e outras plantas, o robô tem uma raiz aterrada, ou “base”, e pode crescer continuamente à medida que se expande para adicionar material na sua ponta”. O objetivo principal da pesquisa é avaliar a viabilidade e eficácia do uso desse robô flexível na inspeção de soldagem em tubos. Assim, ao unir as fases descritiva e exploratória, busca-se não apenas entender a problemática existente, mas também desenvolver uma solução inovadora para a realização da inspeção de soldagem.

### 3.2 Materiais utilizados

Para o desenvolvimento do protótipo foi utilizado:

- Base impressa em 3d;
- Carretel impresso em 3d;
- Base do carretel impresso em 3d;
- Cano de PVC de 150mm;
- Rolo plástico de 50mm;
- Mangueira de ar 6mm;
- Reguladores de fluxo 6mm.
- Válvula reguladora de pressão;
- Conexões 6mm x 1/4”;
- Rolamento para o eixo;
- Eixo de metal;
- Câmera Wifi;
- Parafusadeira;
- Bastões de cola quente;
- Cola PVC;
- Fita adesiva;
- PLA para impressão 3D;
- Mangueira cristal;
- Leds para iluminação.

Ferramentas usadas:

- Estilete;
- Micro retífica;
- Pistola de cola quente;
- Régua;
- Impressora 3D;
- Tesoura;
- Parafusadeira.



### 3.3 Montagem do projeto

No início da montagem, o autor buscou inspiração no projeto da Vine Robots, 2023, que se destacou como o caminho mais promissor através de decisões na matriz morfológica. A jornada de fabricação teve início com a elaboração de desenhos e após isso, tomou-se a decisão de fabricar peças utilizando uma impressora 3D, com material escolhido, PLA, pela sua disponibilidade na instituição.

**Figura 21 - Carretel e suporte feito por meio de impressora 3D.**



Fonte: Autor.

A etapa seguinte envolveu a soldagem do tubo flexível, figura 20, que foi aquecido e prensado usando ferramentas para garantir uma vedação em sua extremidade, onde seria posteriormente conectada ao carretel. Em seguida, prosseguiu-se com a montagem do corpo principal do robô, utilizando tubos de PVC e tampas.

**Figura 22 - Solda do tubo flexível.**



Fonte: Autor.

Foram criadas aberturas para permitir a entrada de ar e a saída do robô. Para garantir que essas aberturas fossem vedadas, utilizou-se materiais como borracha de vedação de cano de PVC, cola quente e silicone. No andamento do projeto, o carretel foi unido ao eixo com cola instantânea e fita adesiva, e o tubo flexível foi amarrado ao centro do carretel. Em seguida, as bases foram fixadas nas extremidades das tampas, e os rolamentos de apoio do eixo foram instalados. A finalização se deu fazendo a dobra do tubo flexível e fixação do mesmo na parte externa.

**Figura 23 - Montagem teste Eixo no carretel.**



Fonte: Autor

**Figura 24 - Início da montagem.**



Fonte: Autor.

**Figura 25 - Montagem do corpo do robô, com cabo para amarração da câmera.**



Fonte: Autor.

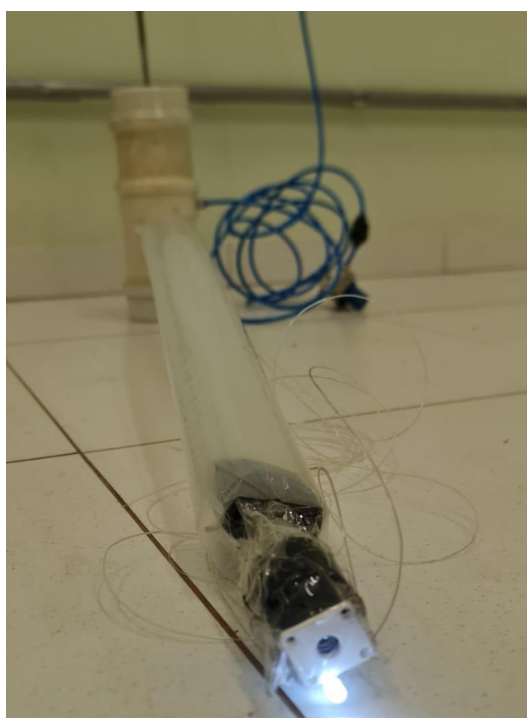
Foi desenvolvido um suporte para fazer direcionamento do corpo do robô, usando uma peça impressa em 3D aliado a linhas de anzol. Essa ferramenta permitiu o controle de direção dentro de tubos.

**Figura 26 - Controlador direcional.**



Fonte: Autor

**Figura 27 - Corpo finalizado, com tubo flexível inflado e câmera presa.**



Fonte: Autor.

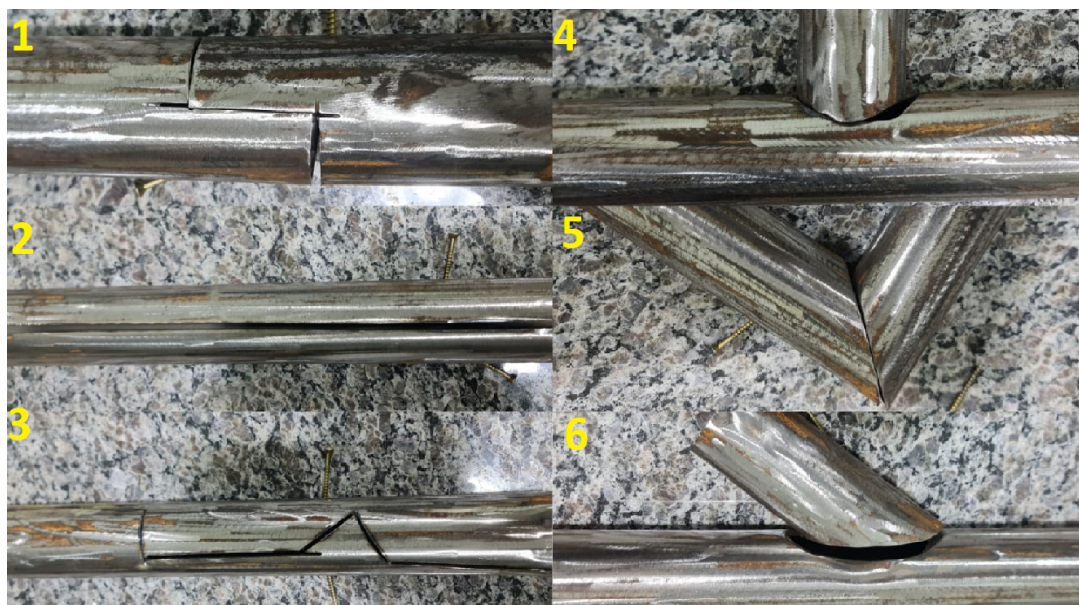
### 3.4 Teste de validação

Para testar o protótipo do robô pneumático de inspeção de solda, o autor utilizou equipamentos e recursos disponíveis no campus. Projetando corpos de prova e soldando no laboratório de soldagem.

O autor optou por desenvolver um cenário real comparativo para seu método inovador, nesse cenário ele desenvolveu seis corpos de prova com tubos redondos, de 50mm de diâmetro, cada uma com soldas em diferentes ângulos e junções.

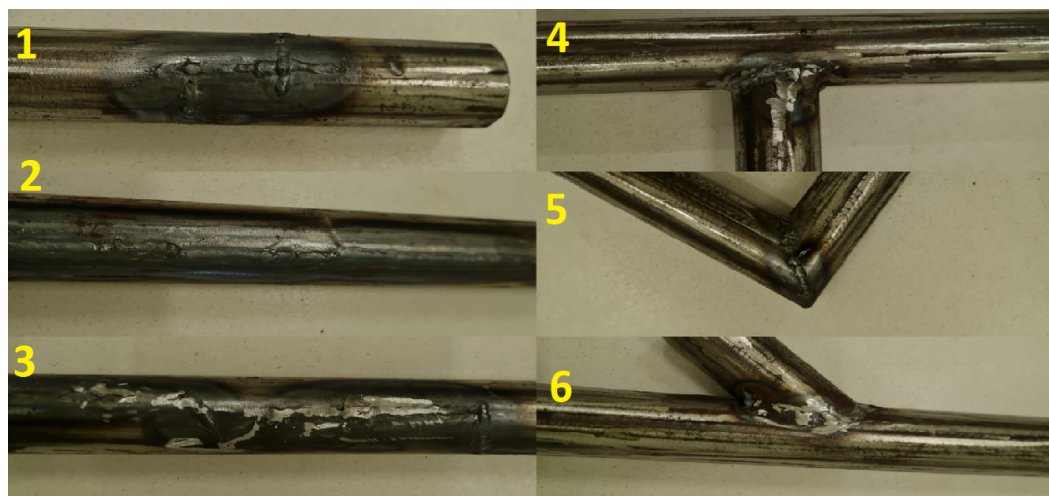
- Corpo de prova 1: Junção contínua de um tubo;
- Corpo de prova 2: Linha de fechamento;
- Corpo de prova 3: Linha de fechamento com costura;
- Corpo de prova 4: Junção em “T”;
- Corpo de prova 5: Junção em “L”;
- Corpo de prova 6: Junção em grau.

**Figura 28 - Corpos de prova antes da solda, identificados.**



Fonte: Autor.

**Figura 29 - Corpos de prova soldados para o teste.**



Fonte: Autor.

Em discussão com um professor especialista em soldagem o autor optou por soldar os corpos de prova 1 a 3 com solda TIG e os outros 3 com solda MIG, em virtude da complexidade dos ângulos e diferenças de encaixes nas peças. Tubos foram soldados por profissional capacitado em soldagem.

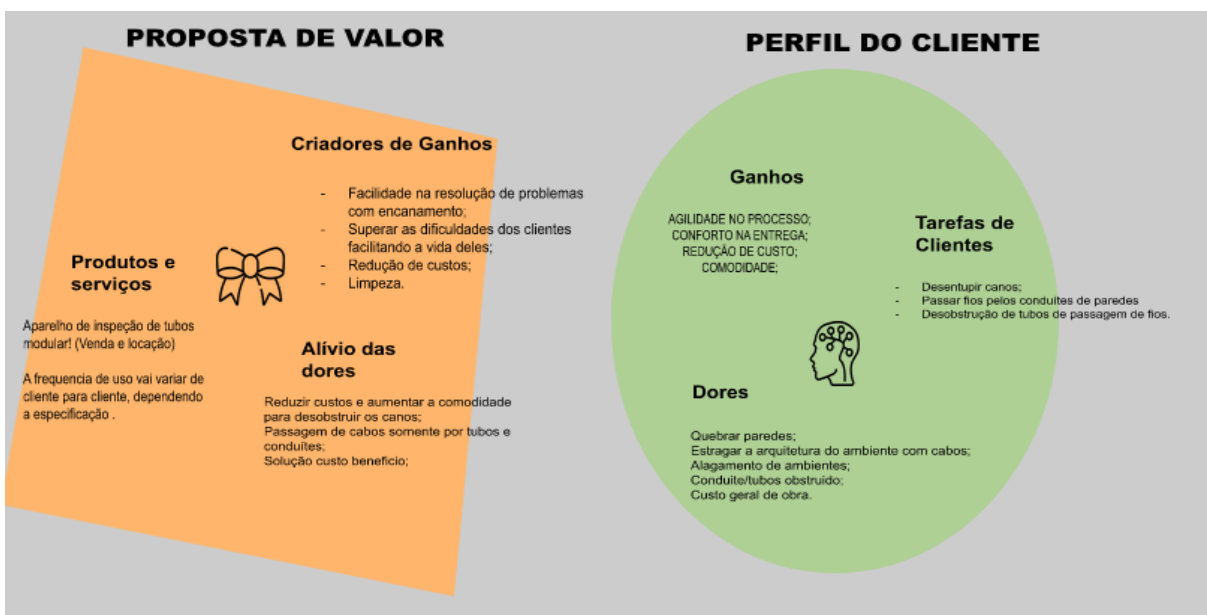
#### 4 DESAFIO EM EMPREENDEDORISMO

Durante o semestre dedicado ao desenvolvimento do projeto, o pesquisador se depara com uma solicitação vinda do professor responsável para participar de um desafio de empreendedorismo denominado "PROTOTYPE 4.0". "Um desafio de inovação entre equipes da Rede Federal com duração de 7 semanas e foco na Economia 4.0. Além disso, também consiste na capacitação de ambientes de inovação da Rede Federal para processos de pré-incubação e incubação" (PROTOTYPE 4.0, 2023).

No decorrer dessas sete semanas, a equipe formada pelo pesquisador e mais três colegas se dedicou à tarefa de validar hipóteses, mergulhar na análise de problemas, compreender as complexidades do mercado e, por fim, identificar as necessidades dos potenciais clientes. Essa fase se revelou como um dos pilares fundamentais do projeto, uma vez que a equipe pôde definir o rumo a ser seguido com base nessas análises. Posteriormente, após a avaliação dessa etapa, a decisão tomada foi a de conceber um produto de natureza modular. Tal decisão decorreu da identificação de demandas em diferentes solicitações, que eram desde a inspeção de tubos até a desobstrução de canos e passagem de fios.

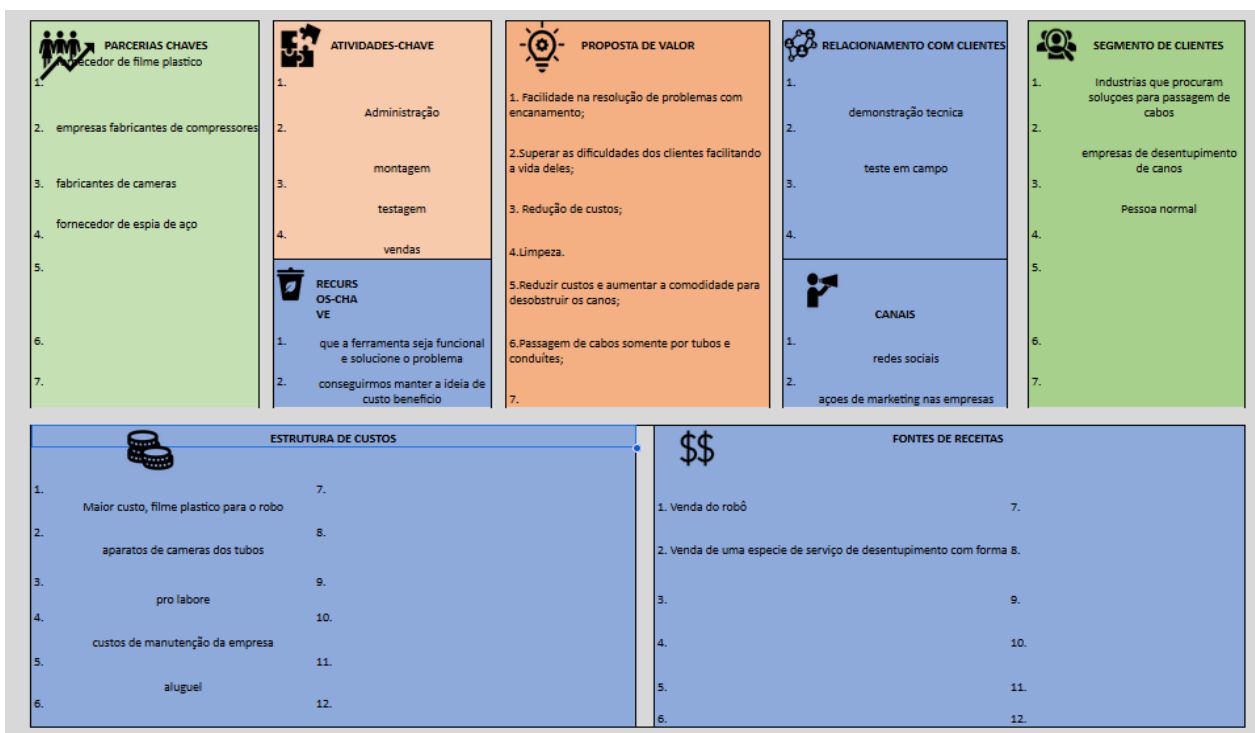
A continuidade do processo incluiu a criação de um canvas de propostas de valor, figura 30, que desempenhou um papel central na compreensão das dores dos clientes e como o produto poderia atendê-los. Em busca de definir as metas do produto, a equipe também elaborou um segundo canvas, figura 31, com foco no desenvolvimento do modelo de negócios, delineando estratégias para garantir a lucratividade do produto.

Figura 30 - Canvas propostas de valor.



Fonte: Autor.

Figura 31 - Canvas modelo de negócios.



Fonte: Autor.



Como ponto-chave do projeto, a equipe desenvolveu um protótipo inicial para testar o produto e validar um modelo base, que, em primeiro momento, não se mostrou eficaz. No entanto, ao longo do tempo, esse modelo passou por melhorias significativas e evoluiu.

**Figura 32 - Validação de protótipo.**

Validação do Protótipo	
Descreva a pergunta da validação	Insira o resumos das respostas
Pergunta 1: "O que você achou do protótipo, acredita ser útil para seu uso?"	Maior parte das respostas foram que acreditam sim no potencial do produto e que seria útil, alguns citaram que talvez não para comprar e ter em casa, mas sim para alugar em uma situação necessária
Pergunta 2: "Nas situações que você já teve com relação a canos entupidos, você teria interesse em testar o produto?"	Maior resposta foi sim, pra ver a funcionalidade e se seria realmente um método eficaz de trabalho!
Pergunta 3: "Você compraria esse produto?" qual a ideia de valor que pagaria por ele? e se fosse alugar?"	A resposta média foi de compra seria algo na faixa de R\$150 a 250,00 e o aluguel algo em torno de R\$ 40,00 por dia
Pergunta 4: "Tem alguma sugestão de possível melhora que pode haver nele?"	Sugestões foram: melhorar o acabamento, quem sabe criar um sistema sem a necessidade do uso de compressores, melhorar o enrolamento após o uso!

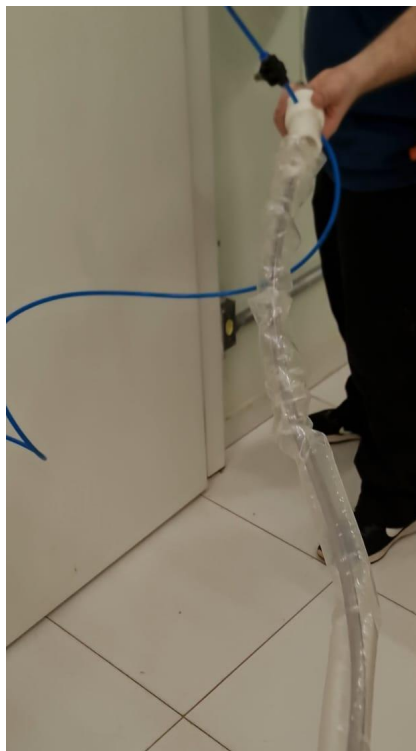
Fonte: Autor.

**Figura 33 - Protótipo inicial desenvolvido para o desafio.**



Fonte: Autor.

**Figura 34 - Teste protótipo inicial desenvolvido para o desafio.**



Fonte: Autor.

Além disso, como parte do desafio, a equipe desenvolveu um pitch de apresentação do produto. O Fitch, cujo link para a apresentação está nos anexos, serviu para transmitir de forma concisa os principais aspectos do produto, conquistando o interesse de professores, colegas e potenciais clientes. Nessa apresentação, destacaram-se os diferenciais, detalharam-se as necessidades dos clientes, delinearam-se estratégias de monetização e, ainda, apresentou-se os responsáveis pelo projeto. Esse desafio se mostrou uma ferramenta importante para oferecer uma compreensão aprofundada de como o produto desenvolvido pode se adaptar de maneira versátil ao mercado e atender às diversas necessidades que ele apresenta.

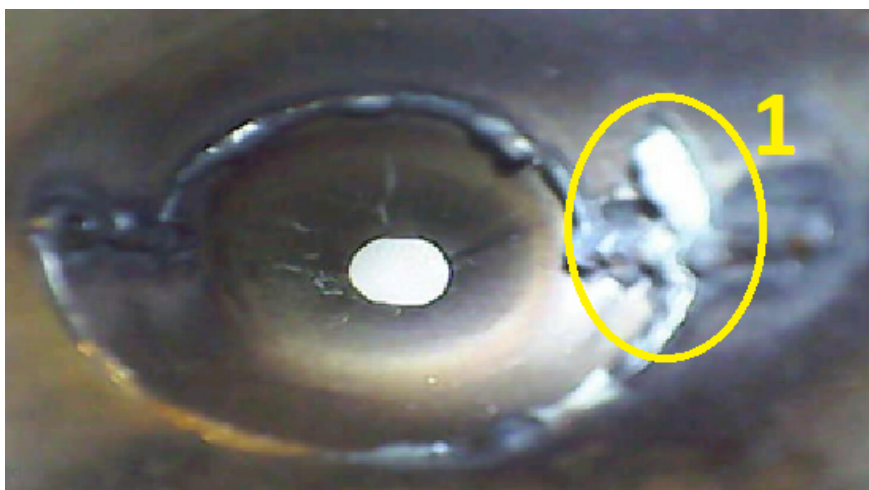
## 5 RESULTADOS E DISCUSSÃO

### 5.1 Resultados do teste de validação

Durante a avaliação do método de inspeção de solda, o autor capturou duas fotografias para cada corpo de prova. O foco principal foi verificar a formação de raízes na solda e observar seu aspecto na parte interna do tubo. A seguir, apresentam-se as imagens correspondentes aos testes de inspeção nos tubos de corpo de prova, juntamente com as conclusões obtidas.

O corpo de prova 1, visto nas figuras 35 e 36, foi submetido a uma soldagem utilizando o processo TIG. A análise revela a formação de uma raiz que penetra na parte interna do tubo. Um aspecto relevante a ser destacado é a região das junções de duas soldas, onde a raiz demonstra um desenvolvimento ainda maior (1). Entretanto, é relevante destacar a ausência de porosidades, contaminação, mordedura e trincas a frio no corpo de prova. Além disso, observou-se apenas uma penetração incompleta em algumas partes internas da junta soldada (2), sem apresentar outros defeitos significativos.

**Figura 35 - Foto 1 do teste no corpo de prova 1 (junção contínua de tubo).**



Fonte: Autor.

**Figura 36 - Foto 2 do teste no corpo de prova 1 (junção contínua de tubo).**



Fonte: Autor.

Na avaliação do corpo de prova 2, que é visto nas figuras 37 e 38, e que também submetido à soldagem por TIG, o autor observou uma solda mais uniforme, sem qualquer indício de descontinuidade. Vale ressaltar que a raiz da solda apresentou um comportamento mais nivelado neste tubo de teste.

**Figura 37 - Foto 1 do teste no corpo de prova 2 (linha de fechamento).**



Fonte: Autor.

**Figura 38 - Foto 2 do teste no corpo de prova 2 (linha de fechamento).**



Fonte: Autor.

No caso do corpo de prova 3, figuras 39 e 40, submetido à soldagem por TIG, observa-se uma solda isenta de descontinuidades. Destaca-se uma raiz de solda moderada nas áreas em que a costura é simples, contrastando com uma raiz mais avantajada nas regiões em que a costura do tubo envolve ângulos e junções complexas, onde está marcado na figura 38.

**Figura 39 - Foto 1 do teste no corpo de prova 3 (linha de fechamento com costura).**



Fonte: Autor.

**Figura 40 - Foto 2 do teste no corpo de prova 3 (linha de fechamento com costura).**



Fonte: Autor.

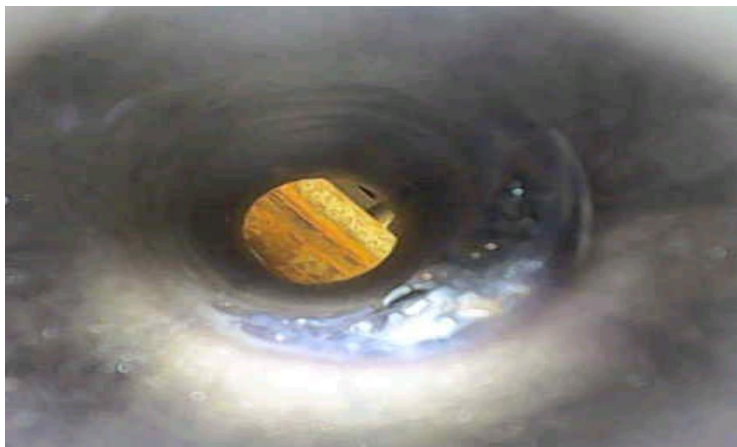
No corpo de prova 4, a soldagem foi realizada utilizando o método MIG. Nessa análise, o autor observa uma presença reduzida na penetração da raiz de solda, sendo a única descontinuidade identificada a falta de penetração em alguns pontos da junção, como podemos ver nas figuras 41 e 42.

**Figura 41 - Foto 1 do teste no corpo de prova 4 (junção em “T”).**



Fonte: Autor.

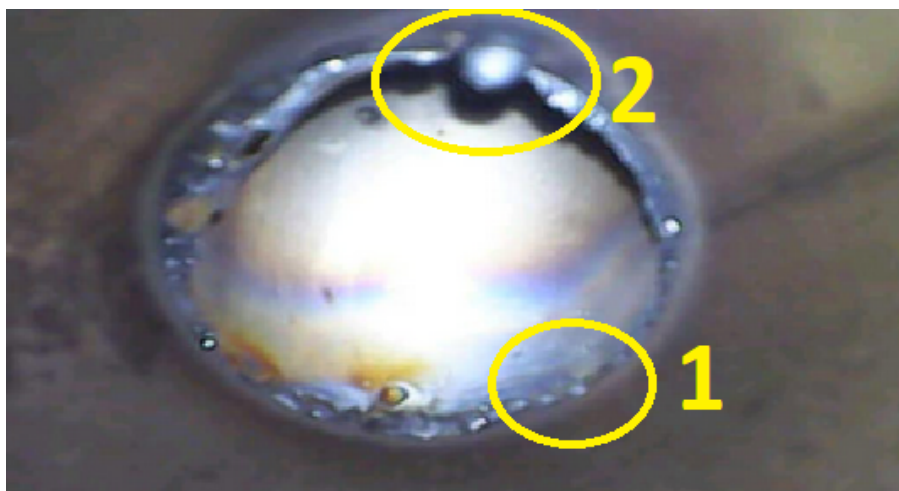
**Figura 42 - Foto 2 do teste no corpo de prova 4 (junção em “T”).**



Fonte: Autor.

No corpo de prova 5, demonstrado nas figuras 43 e 44, e que foi soldado utilizando o método MIG, o autor conduziu testes em ambos os lados. Neste caso, é observada uma raiz moderada na junção dos tubos, contudo, foram identificadas descontinuidades do tipo falta de penetração (1) e fusão incompleta (2).

**Figura 43 - Foto 1 do teste no corpo de prova 5 (junção em “L”).**



Fonte: Autor.

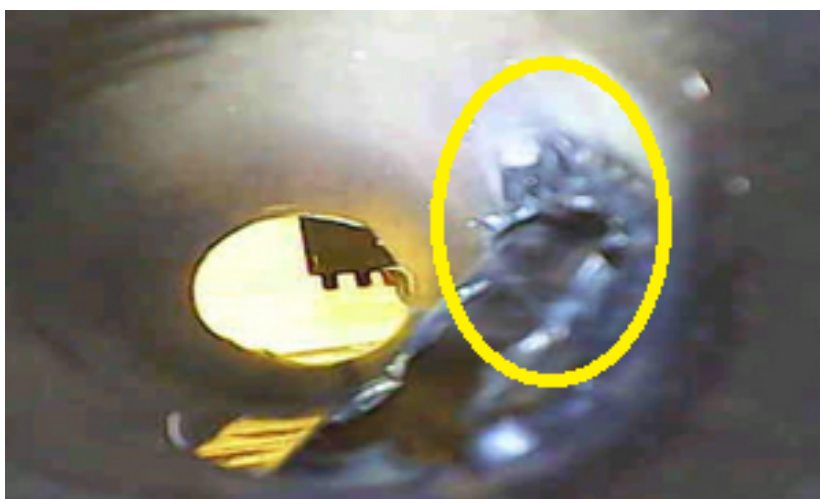
**Figura 44 - Foto 2 do teste no corpo de prova 5 (junção em “L”).**



Fonte: Autor.

No último teste, o sistema encontrou maior dificuldade no deslocamento, pois algumas rebarbas internas, que podemos ver nas figuras 45 e 46, permaneceram na região da junção de solda. No entanto, é importante destacar que, mesmo diante desse desafio, foi possível constatar uma formação leve de raiz na solda, e não foram identificados problemas de descontinuidade. Vale ressaltar que esse teste também foi realizado utilizando o método MIG.

**Figura 45 - Foto 1 do teste no corpo de prova 6 (junção em grau).**



Fonte: Autor.



**Figura 46 - Foto 2 do teste no corpo de prova 6 (junção em grau).**



Fonte: Autor.

Nos resultados dos testes, o autor observou que no método de solda TIG, as raízes de solda são mais extensas, penetrando mais profundamente na parte interna dos tubos. Isso proporciona uma visibilidade ampliada de problemas de descontinuidade, como a penetração incompleta evidenciada no tubo 1. Em contraste, a solda realizada pelo método MIG apresenta uma raiz menor, com menos problemas de descontinuidade. Isso reforça a conclusão de que o método de inspeção por câmera é eficaz e deve ser preferencialmente adotado.

**Figura 47 - Robô pneumático durante os testes.**



Fonte: Autor.

**Figura 48 - Robô pneumático durante os testes.**



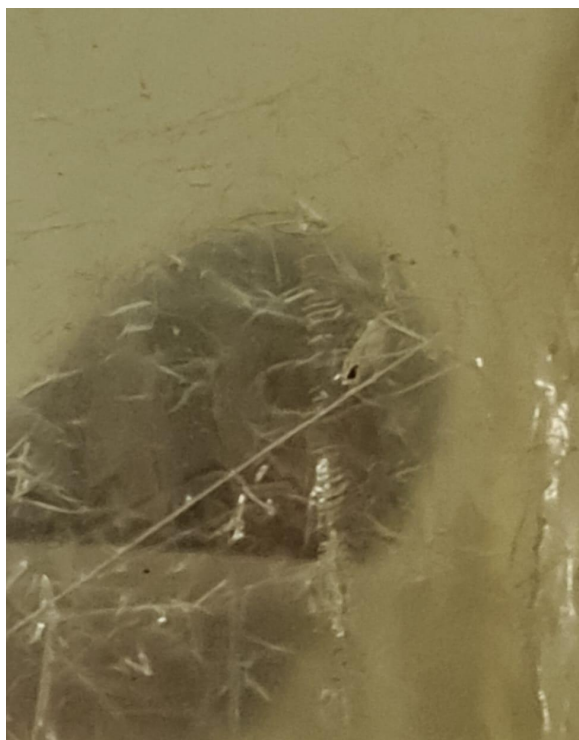
Fonte: Autor.

## 6 CONCLUSÕES E SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS

Durante o desenvolvimento e testes, o método inovador de inspeção de solda demonstrou eficácia, mas também revelou áreas passíveis de melhorias. Um desafio está associado ao material do corpo inflável do robô, que é composto por plástico. Nos testes em tubos recentemente soldados, observou-se a possibilidade de fundir esse material, suscitando preocupações quanto à sua aplicabilidade na indústria.

Outro desafio destacado surgiu em tubos com pequenas rebarbas, que causavam danos ao material flexível do robô. Essas rebarbas deram origem a pequenos furos, resultando em vazamentos ao longo dos testes. Em situações mais críticas, esse problema causou a explosão do corpo inflável do robô.

**Figura 49 - Defeitos causados no robô devido a rebarbas.**



Fonte: Autor.

Um terceiro desafio relaciona-se a tubos mais extensos, onde a qualidade da conexão da câmera tende a diminuir, resultando na perda da capacidade de direcionamento em tempo real, esse problema aliado a baixa qualidade de fotografia em ambientes com baixa iluminação geram uma limitação que impacta a eficiência da inspeção, especialmente em cenários que demandam monitoramento contínuo. Outro ponto válido é a redução do tamanho

do conjunto câmera mais bateria para gerar maior flexibilidade na direção e possibilitar o controle dentro do tubo.

Para projetos futuros, é recomendável a evolução do robô pneumático. Seu método de inspeção inovador apresenta-se como uma alternativa prática, econômica e de execução simples. Investir na melhoria do robô não apenas assegurará maior qualidade nos testes, mas também potencializará seu desempenho e prolongará sua durabilidade.

## 7 REFERÊNCIAS

MARQUES, Paulo Vilani; MODENESI, Paulo; BRACARENSE, Alexandre. **Soldagem - Fundamentos e Tecnologias**. 3ª edição. 2011.

WAINER, Emilio; BRANDI, Sérgio; MELLO, Fábio de. Soldagem - Processos e Metalurgia. 1ª edição. 1998.

FIALHO, Eng. Erivelto Bustamante. Automação Pneumática - Projetos, Dimensionamentos e Análises de Circuitos. 2ª edição. 2009.

SENAI-BA; SENAI-MG; SENAI-RJ. Inspetor de Soldagem. 1ª edição. 2012.

PEREIRA, Bruno Domingues. Inspeção de Juntas Soldadas. Dissertação (Mestrado) - Faculdade de Engenharia, Universidade do Porto, 2020. Disponível em: <https://repositorio-aberto.up.pt/bitstream/10216/129253/2/419955.pdf>. Acesso em: 25 de agosto de 2023.

MORAIS, Alfredo Augusto Martins. Análise do Comportamento da Soldagem em Aço SAE 1020. Universidade Tecnológica Federal do Paraná, 2021. Disponível em: <https://repositorio.utfpr.edu.br/jspui/bitstream/1/26918/1/acomageleetrodorevestido.pdf> Acesso em: 25 de agosto de 2023.

RIJO, Marcos Giovane de Quevedo. Desenvolvimento da Base e Controle do Grau de Liberdade Rotacional de um Robô Cilíndrico com Acionamento Pneumático. 2013. Tese (Pós-Graduação) - Universidade Federal do Rio Grande do Sul (UFRGS). Disponível em: <https://lume.ufrgs.br/handle/10183/75734>. Acesso em: 30 de agosto de 2023.

TRONCO, Mário Luiz. Aula de Robótica. 2017. Apresentação de slides. Universidade de São Paulo (USP). Disponível em: [https://edisciplinas.usp.br/pluginfile.php/3265250/mod\\_resource/content/1/Aula\\_Rob%C3%B3tica\\_2017.pdf](https://edisciplinas.usp.br/pluginfile.php/3265250/mod_resource/content/1/Aula_Rob%C3%B3tica_2017.pdf). Acesso em: 15 de agosto de 2023.

NEGRI, Prof. Dr. Eng. Victor Juliano de. Sistemas Hidráulicos e Pneumáticos - Parte 1. 2001. Apostila - Universidade Federal de Santa Catarina (UFSC). Disponível em: <https://laship.ufsc.br/site/wp-content/uploads/2013/06/SistHPContAutP1.pdf>. Acesso em 25 de agosto de 2023.

Kobelco Welding. (2008). ABC da Soldadura por Arco: Trincas a frio nas soldas em ângulo. Disponível em: [https://www.kobelco-welding.jp/portuguese/education-center/abc/ABC\\_2008-01.html](https://www.kobelco-welding.jp/portuguese/education-center/abc/ABC_2008-01.html). Acesso em: 10 de agosto de 2023.

NOVAIS, Paulo Rogerio Santos de. Avaliação das principais discontinuidades encontradas nas juntas soldadas, causas e possíveis soluções. 2010. Universidade Federal do Paraná (UFPR). Disponível em:

<http://ftp.demec.ufpr.br/disciplinas/TM315/Conte%FAdos%20/Principais%20descontinuidades.pdf>. Acesso em: 10 de agosto de 2023.

FELIZARDO, Ivanilza. Tecnologia da Soldagem. Apostila. Versão 02/2016 - 03/08. Centro Federal de Educação Tecnológica de Minas Gerais - CEFET-MG. Disponível em: <https://www.dem.cefetmg.br/wp-content/uploads/sites/39/2017/09/Apostila-Tecnologia-da-Soldagem.pdf> . Acesso em: 14 de agosto de 2023.

CIRINO, Luciano Machado. Estudo dos efeitos da polaridade na soldagem com corrente contínua e alternada pelos processos TIG e MIG/MAG. 2009. Universidade Federal de Santa Catarina (UFSC). Disponível em: <https://repositorio.ufsc.br/handle/123456789/93009> . Acesso em: 12 de agosto de 2023.

BERGAMIM, João Paulo Cury. Princípio de Pascal em um Experimento. (2007). Universidade Estadual de Campinas, Campinas. Disponível em: [https://www.ifi.unicamp.br/~lunazzi/F530\\_F590\\_F690\\_F809\\_F895/F809/F809\\_sem1\\_2008/JoaoP\\_LandersRF2.pdf](https://www.ifi.unicamp.br/~lunazzi/F530_F590_F690_F809_F895/F809/F809_sem1_2008/JoaoP_LandersRF2.pdf). Acesso em 18 de agosto de 2023

JACOB, Eng. Felipe. 6 Defeitos Comuns em Soldas de Eletrodo Revestido e Como Evitá-los. 2017. Disponível em: <https://calculistadeaco.com.br/6-defeitos-comuns-em-soldas-de-eletrodo-revestido-e-como-evita-las>. Acesso em: 10 de agosto de 2023.

LABTESTE. Ensaio de Micrografia e Macrografia. Disponível em: <https://www.labteste.com.br/ensaio-micrografia-e-macrografia> . Acesso em: 10 de agosto de 2023.

VINEROBOTS. Learn to make your own!. Disponível em: <https://www.vinerobots.org/> . Acesso em: 14 de agosto de 2023.

BERTOLUCI, Cristiane Eloisa. Uso da matriz morfológica para desenvolvimento de produtos de moda a partir de matéria-prima reciclada (2020). Universidade do Estado de Santa Catarina (UFSC). Disponível em: <https://www.redalyc.org/journal/5140/514062546005/514062546005.pdf> Acesso em: 18 de agosto de 2023.

DESAFIO PROTOTYPE 4.0. Desafio prototype 4.0!. Disponível em: <https://desafioprototipe.linhares.ifes.edu.br/> . Acesso em: 22 de agosto de 2023.

## ANEXOS

**Anexo 1:** Pitch desafio prototype 4.0. Disponível em: <https://youtu.be/wq3kYIuqmAc>;