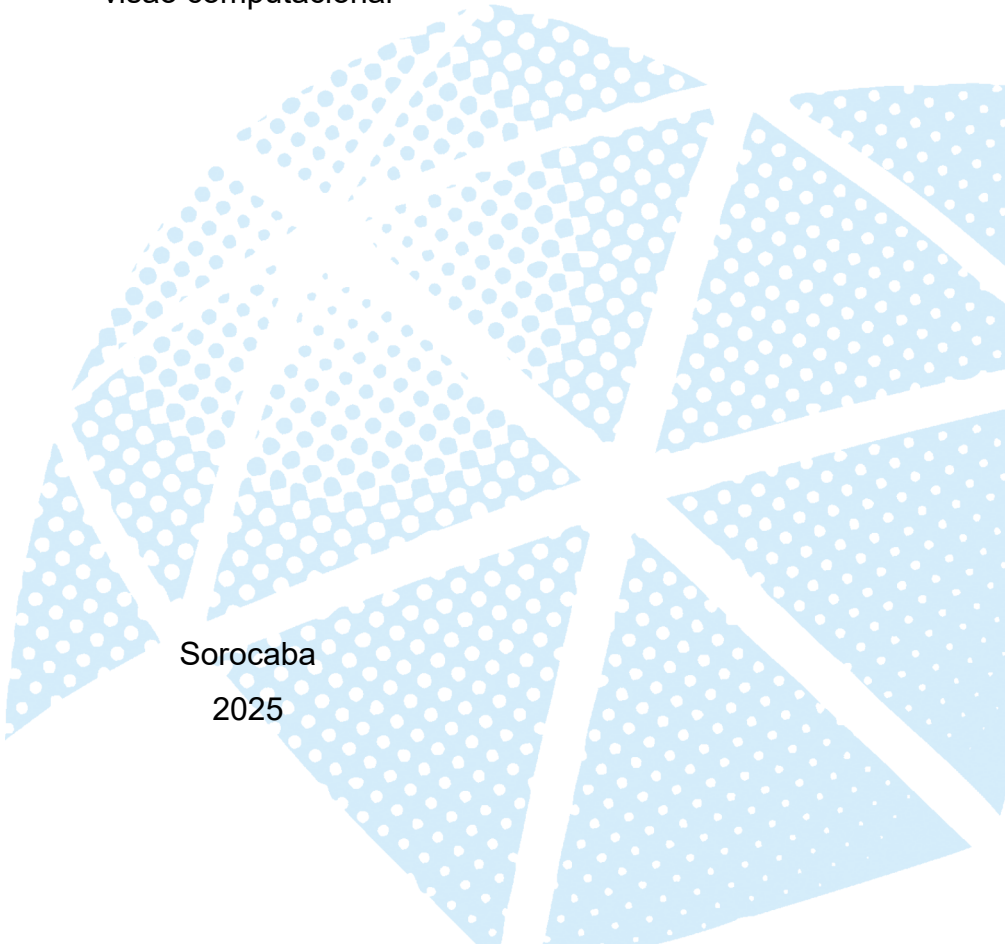


**UNIVERSIDADE ESTADUAL PAULISTA - UNESP**  
**Instituto de Ciência e Tecnologia - Campus de Sorocaba**

**Anderson Cardozo da Costa Ortega Martines**

**Aplicativo Móvel Para Inspeção de Solda Industrial:**  
visão computacional

Sorocaba  
2025



**Anderson Cardozo da Costa Ortega Martines**

**Aplicativo Móvel Para Inspeção de Solda Industrial:**  
visão computacional

Dissertação apresentada à Universidade Estadual Paulista (UNESP), Instituto de Ciência e Tecnologia, Sorocaba, para obtenção do título de Mestre em Engenharia Elétrica.

Área de Concentração: Automação

Orientador(a): Prof. Dr. Ivando Severino  
Diniz

Sorocaba

2025

|       |                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                            |
|-------|------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| M385a | <p>Martines, Anderson Cardozo da Costa Ortega</p> <p>Aplicativo móvel para inspeção de solda industrialtrial : visão computacional / Anderson Cardozo da Costa Ortega Martines. -- Sorocaba, 2025</p> <p>118 p.</p> <p>Dissertação (mestrado) - Universidade Estadual Paulista (UNESP), Instituto de Ciência e Tecnologia, Sorocaba</p> <p>Orientador: Ivando Severino Diniz</p> <p>1. Aplicativos móveis. 2. Inteligência artificial. 3. Soldagem. 4. Controle de qualidade. 5. Automação. I. Título.</p> |
|-------|------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|



UNIVERSIDADE ESTADUAL PAULISTA

Câmpus de Sorocaba

### CERTIFICADO DE APROVAÇÃO

**TÍTULO DA DISSERTAÇÃO:** Aplicativo Móvel Para Inspeção de Solda Industrial: Visão Computacional

**AUTOR:** ANDERSON CARDOZO DA COSTA ORTEGA MARTINES

**ORIENTADOR:** IVANDO SEVERINO DINIZ

Aprovado como parte das exigências para obtenção do Título de Mestre em Engenharia Elétrica, área: Automação pela Comissão Examinadora:

Documento assinado digitalmente  
**IVANDO SEVERINO DINIZ**  
Data: 11/11/2025 12:13:48-0300  
Verifique em <https://validar.itl.gov.br>

Prof. Dr. IVANDO SEVERINO DINIZ (Participação Presencial)  
Departamento de Engenharia de Controle e Automação / UNESP / Câmpus de Sorocaba - ICTS

Documento assinado digitalmente  
**MARIA GLÓRIA CAÑO DE ANDRADE**  
Data: 11/11/2025 17:52:03-0300  
Verifique em <https://validar.itl.gov.br>

Profª. Drª. MARIA GLÓRIA CAÑO DE ANDRADE (Participação Presencial)  
Departamento de Engenharia de Controle e Automação / UNESP / Câmpus de Sorocaba - ICTS

Documento assinado digitalmente  
**FABRÍCIO LEONARDO SILVA**  
Data: 03/11/2025 18:14:47-0300  
Verifique em <https://validar.itl.gov.br>

Prof. Dr. FABRÍCIO LEONARDO SILVA (Participação Virtual)  
Departamento de Engenharia Mecânica / Universidade Federal do Triângulo Mineiro - UFTM

Sorocaba, 30 de outubro de 2025.

*Dedico este trabalho a minha mãe que trabalhando no jardim e costurando nossas roupas, com muita simplicidade me guiou até aqui.*

## **AGRADECIMENTOS**

Agradeço primeiramente à minha mãe e ao meu pai, pelo amor incondicional, apoio e incentivo em todos os momentos da minha vida. Sem vocês, nada disso seria possível.

Ao meu orientador, Prof. Ivando Severino Diniz, pela orientação, paciência, confiança, mesmo sabendo que era praticamente um suicídio me orientar ele aceitou o desafio e hoje podemos comemorar. Aos membros da banca, ao GASI e ao departamento de Engenharia Elétrica da UNESP de Sorocaba.

Ao meu grande amigo Amilton Cordeiro de Freitas, pela amizade sincera, pelos conselhos e por estar sempre disposto a ajudar nas horas mais difíceis. Sua parceria foi essencial nessa jornada de 1%.

Ao Diego Rossi, pela ajuda, colaboração e parceria ao longo do desenvolvimento deste trabalho.

Agradeço também ao André Cassulino e ao Everson Gustavo, pelo apoio e contribuições fundamentais na parte de programação, que foram decisivas para a conclusão desta pesquisa.

Estendo meus agradecimentos a todos os colegas e professores da Fatec Sorocaba e da Fatec Itapetininga, pelo convívio, pelos aprendizados compartilhados e pelo apoio durante todo o percurso acadêmico.

A todos que, de alguma forma, contribuíram para a realização deste mestrado, deixo meu sincero muito obrigado.

"Nada na vida deve ser temido, apenas compreendido. Agora é hora de compreender mais para temer menos".  
(Marie Curie).

## RESUMO

Este trabalho propõe o desenvolvimento de um aplicativo para inspeção de cordões de solda por meio de redes neurais convolucionais com suporte aos principais processos de soldagem industrial: MIG/MAG, TIG e Eletrodo revestido. A metodologia envolve a coleta e rotulagem de um banco de dados com dez mil imagens de soldas industriais. À qualidade dos cordões de solda desempenha um papel crucial na integridade estrutural de componentes utilizados em setores industriais como o automotivo, naval, aeroespacial e de construção civil. Métodos tradicionais de inspeção, como a visual manual e os ensaios não destrutivos, embora amplamente utilizados, apresentam limitações quanto à subjetividade, custo e viabilidade para inspeções em tempo real. Além disso, com a crescente competitividade global, o avanço tecnológico e a escassez de profissionais qualificados, torna-se necessário desenvolver soluções automatizadas, de baixo custo e alta confiabilidade. O modelo foi treinado utilizando a biblioteca *TensorFlow* no ambiente Google Colab, com foco na identificação de falhas visuais externas como trincas, porosidades e falta de fusão. Além da inteligência artificial, existe o desenvolvimento de um aplicativo mobile, que servirá como interface operacional para inspeção e registro, permitindo o carregamento de imagens, execução do modelo treinado e armazenamento dos resultados em banco de dados. Espera-se que o sistema alcance altos níveis de acurácia e desempenho, com capacidade para ser aplicado em ambientes reais de produção industrial. Os resultados deste projeto contribuem para a modernização dos processos de controle de qualidade na soldagem, promovendo maior eficiência, rastreabilidade e padronização. A proposta está alinhada aos princípios da Indústria 4.0, ao integrar visão computacional, inteligência artificial, automação e conectividade em um único sistema inteligente.

Palavras-chave: inspeção de solda, Aplicativo móvel, rede neural convolucional, soldagem TIG/MIG/MAG, inteligência artificial

## ABSTRACT

. In this context, this work proposes the development of an automated system for weld bead inspection using convolutional neural networks (CNNs), supporting the main industrial welding processes: MIG/MAG, TIG, and shielded metal arc welding. The methodology includes the collection and labeling of a dataset comprising five thousand industrial weld images, with 70% used for training and 30% for validation. The quality of weld beads plays a crucial role in the structural integrity of components used in industrial sectors such as automotive, naval, aerospace, and civil construction. Traditional inspection methods, such as manual visual inspection and non-destructive testing (NDT), although widely used, present limitations in terms of subjectivity, cost, and real-time applicability. Moreover, with increasing global competitiveness, technological advancement, and a shortage of qualified professionals, it becomes necessary to develop automated, low-cost, and highly reliable solutions. The model was trained using the TensorFlow library in a Google Colab environment, focusing on detecting visual defects such as cracks, porosities, and lack of fusion. In addition to the artificial intelligence model, a mobile application will be developed to serve as an operational interface for inspection and data logging, allowing image upload, model execution, and result storage in a database. The system is expected.

as be to achieve high accuracy and performance, with sufficient robustness for use in industrial production environments. The results of this project contribute to the modernization of quality control in welding processes, promoting greater efficiency, traceability, and standardization. The proposal aligns with the principles of **Industry 4.0**, by integrating computer vision, artificial intelligence, automation, and connectivity into a single intelligent system.

**Keywords:** weld inspection, mobile Application, convolutional neural network, TIG/MIG/MAG welding, artificial intelligence,

## LISTA DE FIGURAS

|                                                                              |    |
|------------------------------------------------------------------------------|----|
| Figura 1 - Preço câmera ux30 usada.....                                      | 20 |
| Figura 2 - Arquitetura de uma rede neural convolucional.....                 | 24 |
| Figura 3 - Rede neural artificial.....                                       | 25 |
| Figura 4 - Sistema linearmente separável.....                                | 26 |
| Figura 5 - Arquitetura rede neural FNN.....                                  | 27 |
| Figura 6 - Arquitetura CNN.....                                              | 28 |
| Figura 7 - Processo de convolução.....                                       | 29 |
| Figura 8 - Max pooling.....                                                  | 30 |
| Figura 9 - Função sigmoide.....                                              | 31 |
| Figura 10 - Função tangente hiperbólica.....                                 | 32 |
| Figura 11 - Função ReLu.....                                                 | 32 |
| Figura 12 - Função ativação ReLu.....                                        | 33 |
| Figura 13 - Formação teórica da solda pela superfície.....                   | 38 |
| Figura 14 - Representação de uma estrutura metálica em contato com o ar..... | 38 |
| Figura 15 - Classificação dos processos de soldagem por fusão.....           | 39 |
| Figura 16 - Classificação dos processos de soldagem por pressão.....         | 39 |
| Figura 17 - Soldagem a quente por pressão.....                               | 40 |
| Figura 18 - Soldagem a quente por fusão.....                                 | 41 |
| Figura 19 - Geração do arco elétrico.....                                    | 42 |
| Figura 20 - geradora de solda.....                                           | 43 |
| Figura 21 - Inversora de solda.....                                          | 43 |
| Figura 22 - Retificadora de solda.....                                       | 44 |
| Figura 23 - Transformador de solda.....                                      | 44 |
| Figura 24 - Porta eletrodo e garra de aterramento.....                       | 45 |
| Figura 25 - Partes do eletrodo.....                                          | 46 |
| Figura 26 - Esquema soldagem eletrodo revestido.....                         | 47 |
| Figura 27 - Arco elétrico na soldagem mig/mag.....                           | 47 |
| Figura 28 - Dispositivo alimentação arame de solda.....                      | 48 |
| Figura 29 - Bobina arame de solda com 300kg.....                             | 49 |
| Figura 30 - Vista explodida tocha mig/mag.....                               | 50 |
| Figura 31 - Manômetro.....                                                   | 52 |
| Figura 32 - Fluxômetro.....                                                  | 53 |
| Figura 33 - Diagrama sistema de soldagem segundo AWS.....                    | 53 |
| Figura 34 - Influência da corrente na penetração da solda.....               | 54 |
| Figura 35 - Influência da voltagem na penetração da solda.....               | 54 |
| Figura 36 - Influência da corrente na penetração da solda.....               | 55 |
| Figura 37 - Ilustração processo Tig.....                                     | 56 |
| Figura 38 - Eletrodos de tungstênio.....                                     | 56 |
| Figura 39 - Ilustração processo Tig.....                                     | 58 |
| Figura 40 - Porosidade.....                                                  | 60 |
| Figura 41 - Inclusões.....                                                   | 60 |
| Figura 42 - Falta de Fusão.....                                              | 61 |
| Figura 43 - Falta de Penetração.....                                         | 62 |
| Figura 44 - concavidade e sobreposição.....                                  | 62 |
| Figura 45 - Trincas.....                                                     | 63 |
| Figura 46 - Mordeduras.....                                                  | 63 |
| Figura 47 - Inspeção visual.....                                             | 65 |

|                                                                    |     |
|--------------------------------------------------------------------|-----|
| Figura 48 - Inspeção líquido penetrante.....                       | 66  |
| Figura 49 - Inspeção partículas magnéticas .....                   | 67  |
| Figura 50 - Esquema inspeção radiográfica.....                     | 68  |
| Figura 51 - Equipamento soldagem Tig Syncrowave 250 DX Runner..... | 71  |
| Figura 52 - Tocha Tig .....                                        | 72  |
| Figura 53 - Gás argônio utilizado.....                             | 73  |
| Figura 54 - Fluxômetro.....                                        | 73  |
| Figura 55 - Barra chata inox .....                                 | 74  |
| Figura 56 - Celular utilizado .....                                | 76  |
| Figura 57 - Parâmetros do celular.....                             | 76  |
| Figura 58 - Rótulos.....                                           | 79  |
| Figura 59 - Solda boa .....                                        | 79  |
| Figura 60 - Solda ruim.....                                        | 80  |
| Figura 61 - Início da CNN .....                                    | 80  |
| Figura 62 - Estrutura Data-Set.....                                | 81  |
| Figura 63 - Classificação do dataset .....                         | 82  |
| Figura 64 - Solda boa simulada.....                                | 85  |
| Figura 65 - Solda ruim simulada .....                              | 86  |
| Figura 66 - Código HTML.....                                       | 88  |
| Figura 67 - Tela aplicativo .....                                  | 89  |
| Figura 68 - Análise solda 1.....                                   | 89  |
| Figura 69 - Parâmetros do aplicativo.....                          | 90  |
| Figura 70 - Recomendações de possíveis soluções.....               | 91  |
| Figura 71 - Corpo de Prova 1 .....                                 | 92  |
| Figura 72 - Análise 1 .....                                        | 93  |
| Figura 73 - Corpo de Prova 2 .....                                 | 94  |
| Figura 74 - Análise 2 .....                                        | 94  |
| Figura 75 - Corpo de Prova 3 .....                                 | 95  |
| Figura 76 - Análise 3.....                                         | 96  |
| Figura 77 - Corpo de Prova 4 .....                                 | 97  |
| Figura 78 - Análise 4 .....                                        | 97  |
| Figura 79 - Corpo de Prova 5 .....                                 | 98  |
| Figura 80 - Análise 5.....                                         | 99  |
| Figura 81 - Corpo de Prova 6 .....                                 | 100 |
| Figura 82 - Análise 6 .....                                        | 100 |
| Figura 83 - Corpo de Prova 7 .....                                 | 101 |
| Figura 84 - Corpo de prova 7.....                                  | 102 |
| Figura 85 - Corpo de Prova 8 .....                                 | 103 |
| Figura 86 - Análise 8 .....                                        | 103 |
| Figura 87 - Corpo de Prova 9.....                                  | 104 |
| Figura 88 - Análise 9.....                                         | 104 |
| Figura 89 - Resultado Rede Neural.....                             | 106 |
| Figura 90 - Evolução da Acurácia do modelo.....                    | 108 |
| Figura 91 - Perda do modelo.....                                   | 109 |
| Figura 92 - Solda analisada I .....                                | 109 |
| Figura 93 - Detalhe solda analisada I.....                         | 111 |

## **LISTA DE TABELAS**

|                                                         |    |
|---------------------------------------------------------|----|
| Tabela 1 - Material em relação ao Gás de proteção ..... | 51 |
| Tabela 2 - Classificação do gás inerte ou ativo .....   | 52 |
| Tabela 3- Passos ensaio liquido penetrante .....        | 66 |

## LISTA DE ABREVIACÕES

AC – Corrente Alternada

CNNs – Rede Neurais Convolucionais

DC - Corrente Continua

FNN - *Feedforward Neural Network*

GPUs – Unidade de Processamento Gráfico

HTML - *HyperText Markup Language*

IA - Inteligência Artificial

MAG - Metal Ativo Gás

MIG - Metal Inerte Gás

ReLU - *Rectified Linear Unit*

TIG - Tungstênio Inerte Gás

TPUs – Unidade de Processamento Tensorial

## SUMÁRIO

|          |                                                                                         |            |
|----------|-----------------------------------------------------------------------------------------|------------|
| <b>1</b> | <b>INTRODUÇÃO .....</b>                                                                 | <b>14</b>  |
| 1.1      | JUSTIFICATIVA .....                                                                     | 16         |
| 1.2      | OBJETIVO GERAL.....                                                                     | 17         |
| 1.3      | OBJETIVOS ESPECÍFICOS.....                                                              | 17         |
| 1.4      | DIVISÃO DO TRABALHO .....                                                               | 18         |
| <b>2</b> | <b>REVISÃO DA LITERATURA .....</b>                                                      | <b>19</b>  |
| 2.1      | UTILIZAÇÃO DA INTELIGÊNCIA ARTIFICIAL .....                                             | 19         |
| 2.2      | UTILIZAÇÃO DE SISTEMAS INTELIGENTES PARA INSPEÇÃO DE SOLDA.....                         | 19         |
| 2.3      | INTELIGÊNCIA ARTIFICIAL .....                                                           | 21         |
| 2.4      | REDE NEURAL .....                                                                       | 23         |
| 2.5      | PERCEPTRON SIMPLES .....                                                                | 24         |
| 2.6      | REDE NEURAL FEEDFORWARD .....                                                           | 26         |
| 2.7      | REDE NEURAL CONVOLUCIONAL.....                                                          | 27         |
| 2.8      | FUNÇÃO DE ATIVAÇÃO.....                                                                 | 30         |
| <b>3</b> | <b>REFERÊNCIAL TEÓRICO .....</b>                                                        | <b>35</b>  |
| 3.1      | HISTÓRICO DA SOLDAGEM.....                                                              | 35         |
| 3.2      | PROCESSOS DE UNIÃO DOS MATERIAIS .....                                                  | 37         |
| 3.3      | TIPOS DE SOLDAGEM POR FUSÃO.....                                                        | 41         |
| 3.3.1    | <i>Soldagem por arco elétrico.....</i>                                                  | <i>41</i>  |
| 3.3.2    | <i>Soldagem pelo processo eletrodo revestido .....</i>                                  | <i>45</i>  |
| 3.3.3    | <i>Soldagem pelo processo MIG/MAG.....</i>                                              | <i>47</i>  |
| 3.3.4    | <i>Soldagem pelo processo TIG .....</i>                                                 | <i>55</i>  |
| 3.4      | DEFEITOS NA JUNTA SOLDADA .....                                                         | 59         |
| 3.5      | INSPEÇÃO NA JUNTA SOLDADA .....                                                         | 64         |
| 3.6      | MÉTODOS DE INSPEÇÃO NA JUNTA SOLDADA .....                                              | 64         |
| <b>4</b> | <b>MATERIAIS E MÉTODOS .....</b>                                                        | <b>70</b>  |
| 4.1      | HARDWARE: MATERIAIS E EQUIPAMENTOS .....                                                | 70         |
| 4.1.1    | <i>Equipamento soldagem Tig Syncrowave 250 DX Runner .....</i>                          | <i>71</i>  |
| 4.1.2    | <i>Tocha TIG .....</i>                                                                  | <i>72</i>  |
| 4.1.3    | <i>Mistura Gasosa para Soldagem TIG.....</i>                                            | <i>72</i>  |
| 4.1.4    | <i>Medição da vazão do gás.....</i>                                                     | <i>73</i>  |
| 4.1.5    | <i>Composição química do aço inox .....</i>                                             | <i>73</i>  |
| 4.1.6    | <i>Telefone móvel utilizado .....</i>                                                   | <i>74</i>  |
| 4.2      | SOFTWARE .....                                                                          | 76         |
| 4.2.1    | <i>Treinamento na rede neural convolucional.....</i>                                    | <i>77</i>  |
| 4.2.2    | <i>Descrição da criação do dataset.....</i>                                             | <i>80</i>  |
| 4.2.3    | <i>Classificação das imagens do Dataset .....</i>                                       | <i>81</i>  |
| 4.2.4    | <i>Descrição do Código: Construção de uma Rede Neural Convolucional com Keras .....</i> | <i>83</i>  |
| 4.2.4.1  | <i>Camadas Densas (Fully Connected).....</i>                                            | <i>84</i>  |
| 4.2.4.2  | <i>Visualização do Modelo .....</i>                                                     | <i>84</i>  |
| 4.3      | MÉTODO.....                                                                             | 84         |
| 4.3.1    | <i>Testes.....</i>                                                                      | <i>85</i>  |
| 4.3.2    | <i>Criação do aplicativo para smartphone.....</i>                                       | <i>87</i>  |
| <b>5</b> | <b>RESULTADOS DAS ANÁLISES DO APLICATIVO.....</b>                                       | <b>92</b>  |
| <b>6</b> | <b>DISCUSSÃO .....</b>                                                                  | <b>106</b> |
| <b>7</b> | <b>CONCLUSÕES .....</b>                                                                 | <b>112</b> |
|          | <b>REFERÊNCIAS .....</b>                                                                | <b>113</b> |

## 1 INTRODUÇÃO

Atualmente a competição global necessita que cada vez mais os processos produtivos sejam assertivos e econômicos , sem margem para erro atraso ou demora, sendo assim as novas tecnologias são imprescindíveis e decisivas no âmbito industrial (YANG et al., 2020).

Além do viés competitivo e econômico também temos que tratar do âmbito ergonômico, pois a ergonomia é a adaptação do trabalho ao homem e a mesma vem se adaptando desde a origem da humanidade, e atualmente vem sendo deixada um pouco de lado, pois em muitos casos acredita-se que a mesma provoca mais custos do que lucros (IIDA;BUARQUE, 2021).

A soldagem é um dos principais processos de produção da indústria metal mecânica. Onde a inspeção da junta soldada é de vital importância para confiabilidade do processo e garantia das características físicas e químicas da junta soldada, logo, a primeira inspeção é a visual. E esta, é muito influenciada pela habilidade, perícia e fadiga do inspetor de soldagem (BARETT et al., 2014).

Na verificação da qualidade da solda, é necessário interromper a produção até que o processo de inspeção seja concluído, ou, assumir o risco de fabricar peças com defeitos, que posteriormente precisarão ser retrabalhadas ou descartadas. Em um cenário industrial competitivo, ambas as alternativas são indesejáveis e acarretam prejuízos significativos (MA et al., 2022).

Existem processos de inspeção da junta soldada, tanto destrutivos quanto não destrutivos, os quais são, em geral, morosos e demandam a atuação de outros operadores para sua execução, ou requerem a paralisação da produção para que o próprio operador realize a inspeção (MOREIRA et al;2008).

A primeira inspeção da soldagem é sem dúvida a inspeção visual e com ela podemos verificar vários aspectos na solda, se existem desvios de descontinuidade, presença de mordeduras, falta de penetração, falta de fusão , excesso de material (KANG et al., 2023).

Verificando esses parâmetros básicos da inspeção visual da soldagem já podemos classificar a solda como boa ou ruim e evitarmos que o processo siga adiante gerando em um posterior retrabalho economizando tempo e recursos, além de aumentar a eficiência do processo.

Atualmente, observa-se um grande crescimento na utilização de inteligências artificiais em diversas áreas do conhecimento, seja para solucionar tarefas genéricas ou específicas (Silva *et al.*, 2024). A inteligência artificial pode ser definida, de forma simplificada, como a capacidade de discernimento humano aplicada a uma máquina, permitindo que esta tome decisões diante de diferentes situações — desde atividades simples e repetitivas até tarefas complexas ou perigosas.

A inteligência artificial está em todas as áreas do conhecimento na área médica por exemplo auxilia na interpretação de raio x, tomografias entre outros, assim o profissional de medicina que tem uma rotina estressante e pesada tem mais tempo para se dedicar ao paciente e tornar o atendimento mais humanizado, deixando o diagnóstico mais ágil (SILVA *et al.*, 2024).

Assim como ocorre na medicina, a inteligência artificial também vem sendo aplicada em áreas como a segurança pública, onde governos investem cada vez mais em monitoramento e reconhecimento facial, identificação de placas de veículos e análise inteligente de dados, com o objetivo de direcionar seus efetivos de maneira estratégica e eficiente (FILHO, 2024).

Outro uso bastante comum atualmente da IA é a utilização em assistentes virtuais para realização de tarefas domésticas, para controle de equipamentos como os assistentes de voz inteligentes, ou em algoritmos de propagandas os quais modificam a forma que o marketing é realizado, interferindo na decisão do comprador (SCHLOSSER *et al.*, 1999).

Tendo em vista a ampla utilização da inteligência artificial e a dificuldade de sua implementação no setor industrial, em razão de seu custo normalmente oneroso, este trabalho propõe uma abordagem simples para iniciar a implementação da análise da junta soldada por meio de imagens obtidas durante o processo, realizando o processamento dessas imagens com uma rede neural convolucional, a fim de classificá-las como aptas ou inaptas.

A obtenção de imagens técnicas, como radiografias de solda e registros fotográficos dos processos operacionais em empresas do setor de soldagem, enfrentam obstáculos significativos decorrentes de fatores técnicos, logísticos e institucionais, uma vez que os métodos, técnicas e conhecimentos especializados, são capazes de aprimorar a qualidade e a eficiência do processo, assim são protegidos como segredos industriais (ZHANG *et al.*, 2019).

Para teste treinamento e validação da rede neural convolucional, é interessante que se tenha um banco de dados com inúmeras imagens o ideal é que se tenha acima de cinco mil imagens (GUIMARÃES et al., 2008).

Então foi utilizado um banco de dados de defeitos de soldagem (BACIOU, 2019) e realizou-se os testes criando uma rede neural convolucional com um banco de dados com dez mil imagens onde 70% foi utilizada para o treinamento do modelo e 30% foi utilizada para validação do modelo. A rede neural convolucional se mostrou muito eficiente na classificação das juntas soldadas mostrando eficiência e rapidez na tomada de decisão, tornando o processo mais eficaz e sem dependência do operador a ideia é que para um trabalho futuro consigamos analisar os filmes radiográficos, pois existe uma grande dificuldade de se formar um banco de dados confiável pelo grande número de amostras necessárias (SILVA et al., 2024).

Onde os mesmos foram muito satisfatórios, aí partimos para segunda parte do trabalho que foi construir um sistema de baixo custo para captar as imagens da poça de fusão após isso criamos um sistema para captação de imagens com o celular para podemos criar um banco de dados autoral classificando-o em “apto” e “inapto”.

## **1.1 Justificativa**

A inspeção da qualidade dos cordões de solda é um aspecto essencial para garantir a integridade estrutural e a segurança dos componentes produzidos na indústria metalmeccânica, especialmente nos processos de soldagem por arco elétrico, como TIG, MIG e Eletrodo revestido. Esses processos apresentam características específicas que influenciam diretamente a formação da junta e os possíveis defeitos, tornando a inspeção uma etapa crítica no controle de qualidade.

Métodos tradicionais de inspeção, como avaliação visual e ensaios não destrutivos, embora eficazes, apresentam limitações importantes, incluindo subjetividade do operador, altos custos, necessidade de paralisação da produção e variação nos resultados devido à fadiga e experiência dos inspetores.

Diante dessas limitações, a aplicação de tecnologias de Visão Computacional combinadas com Redes Neurais Convolucionais (CNNs) surge como uma solução promissora para a automatização da inspeção, permitindo rápida e precisa detecção de defeitos comuns em soldas, como trincas, porosidades e falta de fusão.

Para tornar essa tecnologia acessível e aplicável no ambiente industrial, torna-se fundamental o desenvolvimento de uma interface operacional eficiente. Assim, este trabalho propõe o desenvolvimento de um aplicativo mobile, que atuará como plataforma para a captura e o carregamento das imagens dos cordões de solda, a execução do modelo da inteligência artificial para classificação automática, e o armazenamento dos resultados para rastreabilidade e controle.

O uso do aplicativo permite criar uma aplicação robusta, amigável e de baixo custo, capaz de integrar-se facilmente a sistemas industriais existentes e operar em ambientes Windows, amplamente utilizados no chão de fábrica. Essa solução aproxima a inteligência artificial do operador, facilitando a adoção da tecnologia e contribuindo para a melhoria contínua da qualidade, redução de custos e aumento da produtividade.

Dessa forma, a combinação das redes neurais convolucionais com um aplicativo mobile representa um avanço significativo na inspeção automatizada de cordões de solda por arco elétrico (TIG, MIG e eletrodo revestido), alinhando-se aos princípios da Indústria 4.0 e promovendo maior eficiência, confiabilidade e competitividade no setor metalmeccânico.

## **1.2 Objetivo Geral**

Desenvolver um sistema automatizado para inspeção de cordões de solda por arco elétrico (TIG, MIG e eletrodo revestido) utilizando redes neurais convolucionais para análise de imagens, integrado a um aplicativo que facilite a captura, classificação e armazenamento dos resultados da inspeção, visando aumentar a eficiência, confiabilidade e reduzir a dependência da avaliação manual no ambiente industrial.

## **1.3 Objetivos Específicos**

Desenvolver um aplicativo simples para a interface do usuário, permitindo a captura de imagens, execução do modelo de inteligência artificial e gerenciamento dos resultados da inspeção. Realizar testes práticos para validar a integração do sistema e sua aplicabilidade real.

## 1.4 Divisão do trabalho

A presente dissertação encontra-se estruturada da seguinte forma

- **FUNDAMENTOS TEÓRICOS** – Neste capítulo, é apresentado o referencial teórico da literatura. assim, dará o suporte aos leitores quanto ao estado atual da arte tratado nesta dissertação;
- **REVISÃO DE LITERATURA** – Na revisão bibliográfica, são apresentados os estudos das tecnologias aplicadas no ambiente de soldagem;
- **MATERIAIS E MÉTODOS** – São descritos a metodologia, materiais e aplicação das tecnologias;
- **RESULTADOS E DISCUSSÃO** - São apresentados os resultados do software efetuadas com o sistema de verificação e discussão dos resultados;
- **CONCLUSÃO** - São apresentadas as principais conclusões do trabalho.
- **PERSPECTIVAS FUTURAS** - São apresentadas sugestões para trabalhos futuros.

## **2 REVISÃO DA LITERATURA**

A Inteligência Artificial é uma ciência multidisciplinar da computação que busca simular processos cognitivos humanos, como raciocínio, aprendizado, percepção e tomada de decisão. Por meio de técnicas como aprendizado de máquina, redes neurais artificiais e processamento de linguagem natural, a IA vem sendo aplicada em diversas áreas. Sua principal característica é a capacidade de aprender com dados e melhorar seu desempenho ao longo do tempo, tornando-se uma ferramenta estratégica para inovação, eficiência e competitividade em diferentes setores.(FILHO, 2024).

### **2.1 Utilização da inteligência artificial**

De forma geral a inteligência artificial vem sendo muito estudada em todas as áreas do conhecimento, pois com a indústria 4.0 e automatização de tarefas temos uma crescente na melhoria continua e na velocidade do trabalho, além de que o mundo hoje é totalmente globalizado, a indústria sempre tende a produzir mais com menos recurso tempo, desperdício, e mão de obra.(CHEN et al., 2023).

A soldagem é um dos processos de fabricação mais utilizado no meio industrial operando em diversos setores como , automotivo ,óleo e gás, edificações, e a inspeção da junta soldada é de vital importância para garantir a durabilidade e eficiência dos produtos soldados, atualmente (P. WANG et al., 2025a).

Sabemos que precisamos de um banco de dados robusto com muitas imagens para fazermos o treinamento e validação e teste de uma rede neural, segundo para isso são utilizadas técnicas de data argumentativo (CHEN et al., 2023).

A utilização de CNN para verificação de padrões já vem da área médica onde ela obtém bastante eficiência e auxilia tanto em verificação de rax entre outras tarefas repetitivas.

### **2.2 Utilização de sistemas inteligentes para inspeção de solda**

Quanto à aplicação de tecnologia rede neural convolucional existem bastantes estudos na área da soldagem, por exemplo, Wang 2025 propôs um algoritmo de rastreamento de costura da solda robotizada por visão laser, o projeto de forma geral

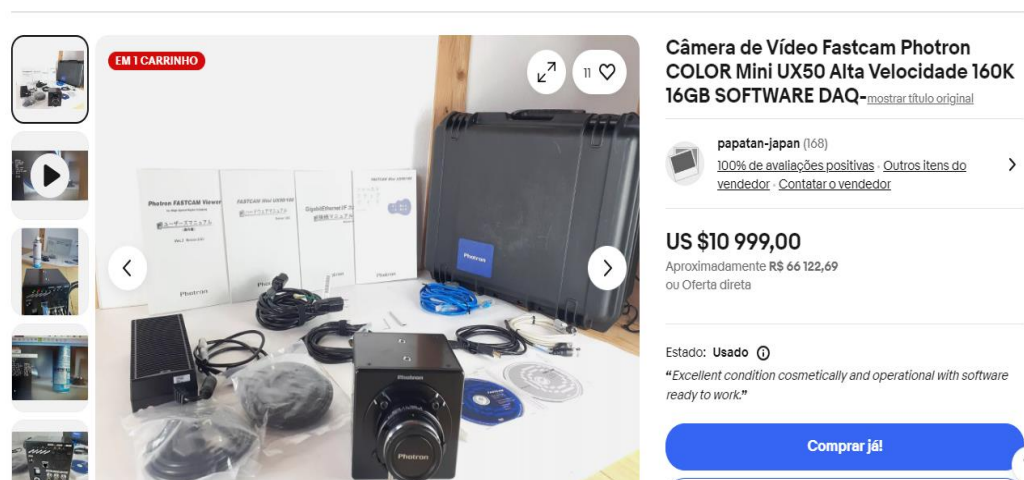
tem um elevado custo, não sendo viável para pequenas empresas, pois os equipamentos de soldagem robotizada as câmeras e sensores inviabilizam a implementação em uma empresa que tenha poucos recursos (P. WANG *et al.*, 2025a).

Já Yu 2025 e colaboradores desenvolveram um estudo para o *status* de penetração da solda , pegando a imagem da poça de fusão e a temperatura do campo de trabalho em um robô de solda (YU *et al.*, 2025).

Similarmente Zhang e Wen(2019), desenvolveram um sistema para verificação da junta soldada de alumínio por meio de um sistema on line de aprendizado profundo com solda robotizada, a grande dificuldade citada é o brilho que o arco elétrico produz na soldagem ,e o mesmo propõe que precisa de um método mais simples pra fazer o controle da soldagem pois seu sistema ,seria de difícil implantação em aplicações industriais praticas (ZHANG *et al.*, 2019).

Já Kang *et al.* (2023) propuseram um modelo de rede neural convolucional para estimar a profundidade da junta sodada em alumínio e cobre em solda por raio laser, pois a profundidade da solda afeta a resistência da solda e a condutividade elétrica em baterias automotivas, foi utilizado uma câmera UX 30 e um sensor foto diodo e iluminação a laser, da mesma forma dos outros projetos o resultado foi muito bom mas a grande problemática é o valor dos matérias , neste caso só a câmera tem o valor de 67mil reais, onde dependendo da aplicação o investimento fica alto.(KANG *et al.*, 2023).A Figura 1 exemplifica este valor.

Figura 1 - Preço câmera ux30 usada.



Fonte: Papatan - 2025

No estudo de Caso (2024), são selecionadas, 43 imagens para o processamento dos dados, após isso ele usa várias técnicas de data argumatation para aumentar o banco de dados, chegando em 1776 imagens para teste treinamento e validação.

Outra questão importante é a quantidade de dados utilizados para treinamento teste e validação do modelo, existem trabalhos que utilizaram 40 imagens outros 100 Yang e seus colaboradores usaram 17.981 imagens para o teste da rede neural e disseram que os resultados que o banco de dados teria de ser mais robusto(YANG et al., 2020)

Ainda como solução, Liu et al. (2023) construiu uma rede neural convolucional, onde ele se utilizou dos filmes de raio-x, para verificar as discontinuidades internas e externas da solda, também optou por uma rede neural explicável por se tratar de peças aeroespaciais, e esse material se muito sensível no quesito de segurança.

## 2.3 Inteligência Artificial

Atualmente a inteligência artificial dá a capacidade as maquinas e equipamento de imitar ou se aproximar da inteligência humana, isso em um contexto de aprendizado, resolução de problemas, raciocínio logico, a inteligência artificial tem a capacidade de interpretar a linguagem natural e se adapta em diversos ambientes (BEZERRA; BARBOZA, 2020; ENSLIN;KAUL, 2025).

O início da inteligência artificial começou nos anos 40 com Warren McCulloch e o matemático Walter Pitts, criando um modelo computacional baseado em matemática e algoritmos (BARBOZA, 2020).

Já em 1950, Turing publicou o artigo "*Computing Machinery and Intelligence*", onde introduziu o famoso teste de Turing, uma proposta para avaliar a capacidade de uma máquina em exibir comportamento inteligente.

Já os programas Logic Theorist (1955) e o General Problem Solver (1957) foram desenvolvidos para resolver problemas lógicos e matemáticos e foram os pioneiros mostrando que as maquinas poderiam lidar com problemas lógicos e de raciocínio (FILIPSSON, 2025).

Em 1959 Arthur Samuel criou um programa de xadrez que aprendia com suas experiências, um dos primeiros exemplos de aprendizado de máquina.

O aumento do poder computacional e a introdução de algoritmos mais sofisticados, como redes neurais profundas, revitalizaram os estudos voltados para a IA, em 1997, o programa *Deep Blue* da IBM derrotou o campeão mundial de xadrez Garry Kasparov, um marco significativo para a IA (GRZYBOWSKI et al., 2024).

Desde então temos testemunhado avanços significativos os quais se alavancaram principalmente nas melhorias na capacidade computacional, na sofisticação dos algoritmos, e na grande disponibilidade de dados para utilização em softwares (ENSLIN;KAUL, 2025).

A definição da inteligência pode variar dependendo do contexto do trabalho onde ela é empregada, basicamente a inteligência artificial se define como, a capacidade de sistemas computacionais executarem tarefas que se exige a inteligência humana, mas esse conceito tem evoluído muito desde o seu surgimento. Embora a história da inteligência artificial é pautada por grandes avanços e por grandes períodos de estagnação, que são conhecidos como, os invernos da inteligência (SICHMAN, 2021).

Existem várias aplicações das inteligências artificiais no mundo de hoje, podemos observar sua grande eficiência na área da automação, pois a mesma pode aumentar a eficiência de tarefas repetidas e rotineiras, além disso libera tempo para executarmos tarefas mais complexas e criativas (PRODEST, n.d.).

A inteligência artificial também é responsável por inovação devido ao processar grande volume de dados, identificação de padrões ocultos em uma variedade de campos, como manufatura ciências medicina, finanças economia (ROUXING et al., 2025).

Na tomada de decisão a inteligência artificial é capaz de analisar dados complexos e fornecer um descritivo, para auxiliar na tomada de decisão em tempo real em uma variedade de contextos, desde a algoritmos de internet e call center até na área da medicina, os algoritmos da inteligência artificial são usados para personalizar experiências do usuário e fornece recomendações de compras, serviços de streaming, mídias sociais (ENSLIN;KAUL, 2025).

A inteligência artificial também abrange a assistência e suporte como por exemplo os assistentes virtuais baseados em IA, como Alexa, google Assistant,

oferecendo suporte vinte e quatro horas, respondendo a perguntas agendando compromissos e realizando tarefas simples do cotidiano (AMARAL, 2021).

Na área da segurança os sistemas de inteligência artificial são utilizados para detectarem atividades suspeitas, detecção de ameaças reconhecimento facial de criminosos entre outros objetivos, na mobilidade e no transporte, já vemos os veículos autônomos, a otimização de rotas gerenciamento de tráfego e sistema de compartilhamento de viagens.

Atualmente vemos uma grande utilização da inteligência artificial em inúmeras atividades do cotidiano humano, existem várias definições para a inteligência artificial. Segundo (McCARTHY, 2017) é a ciência de produzir máquinas inteligentes.

A rede neural convolucional nada mais é que um algoritmo de aprendizado profundo, atualmente tanto a inteligência artificial (BERNE et al., 2025).

Atualmente temos observado uma crescente exponencial no uso da inteligência artificial em todas as áreas do conhecimento, pois ela tem um campo de estudo multidisciplinar. Com inteligência artificial temos a possibilidade de desenvolver dispositivos e aplicativos cujo os quais, os algoritmos podem similar o raciocínio do homem em diversas tarefas e aplicações , esse conceito foi iniciado em 1956 pelo cientista da computação John Mc Carthy (KAUFMAN, 2022).

A inteligência artificial ja faz parte do nosso dia a dia, sendo utilizadas em aplicativos de rede social, no setor de investimento, atendimento ao cliente, no varejo on line. Hoje já temos carros autônomos que operam sem motorista, na área da saúde auxiliando no diagnóstico de doenças e na área da indústria (ENSLIN; KAUL, 2025).

Na indústria a inteligência artificial auxilia na tomada de decisão e no monitoramento de processos, sejam com softwares ou sensores. A grande vantagem da inteligência artificial é seu monitoramento é em tempo real, ou seja, caso exista alguma falha esta será resolvida imediatamente, não precisando chegar ao final do turno por exemplo para ser realizado um ensaio e verificado que um lote de peças está ruim (SILVA et al., 2024).

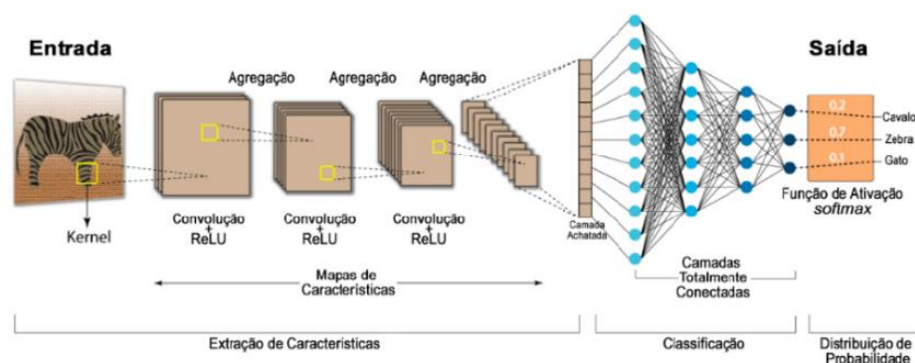
## **2.4 Rede neural**

A rede neural é um subconjunto do aprendizado máquina que está no centro do algoritmo profundo ela é composta por vários nós, e podem te uma ou várias

saídas, os nós vão se conectando, e a eles são atribuídos pesos, e essas informações são passadas pelas suas camadas que vão gerando outras informações até termos a nossa resposta na saída (VARGAS et al., 2016).

As redes neurais são mais utilizadas quando precisamos de tarefas de visão computacional, verificação de imagem, classificação e rotulação, as redes neurais também utilizam a multiplicação de matrizes (BERNE et al., 2025). A figura 2 demonstra a arquitetura de uma rede neural.

Figura 2 - Arquitetura de uma rede neural convolucional

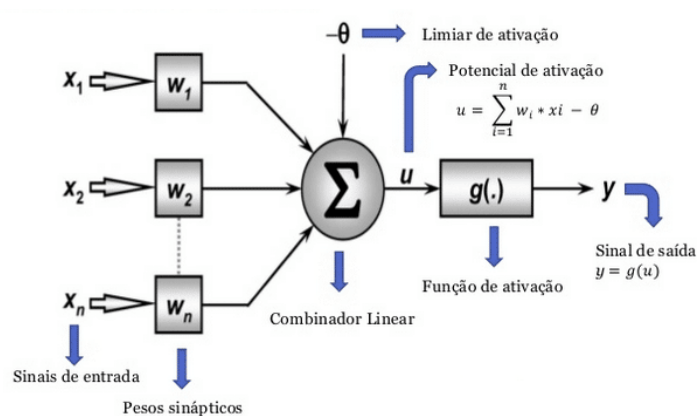


Fonte: Breach - 2017

## 2.5 Perceptron simples

O perceptron simples é um dos primeiros modelos de redes neurais, começou a ser utilizada em 1958, por Frank Rosenblatt, esta rede neural consiste em um sistema classificatório linear, ou seja este sistema de classificação pode separar dados que são linearmente separáveis Estes dados podem ser separados por uma linha ou planos(AUER et al., 2008). A figura 3 exemplifica um perceptron simples

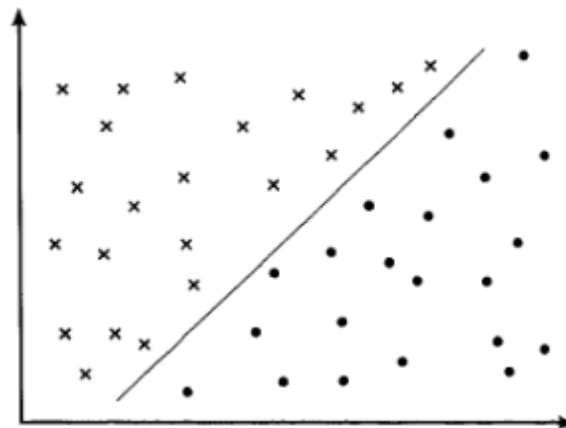
Figura 3 - Rede neural artificial



Fonte: Vinicius - 2017

Basicamente o perceptron simples irá receber um conjunto de entradas, onde estas entradas são os conjuntos de dados que desejamos mapear em nosso processo, sendo que cada uma dessas entradas terá um peso, cujo o qual representará sua importância no sistema em relação ao valor da saída desejada, quando fazemos o resultado da somatória das entradas ponderadas junto com o limiar de ativação este é passado como argumento da função de ativação onde teremos o resultado da saída, esta função de ativação será normalmente uma função de degrau ou bipolar (AUER et al., 2008). Como no esquema da figura 4.

Figura 4 - Sistema linearmente separável



Fonte: Gonçalves - 2015

Para superar a limitação do Perceptron simples foi criado o perceptron multi camadas que é uma rede neural com uma ou mais camadas ocultas, onde não podemos prever a saída desejada das camadas mais profundas, utilizamos o algoritmo Back propagation para treinar este tipo de rede, lembrando que podemos ter uma ou mais camadas de neurônios (ZHU et al., 2024).

## 2.6 Rede neural feedforward

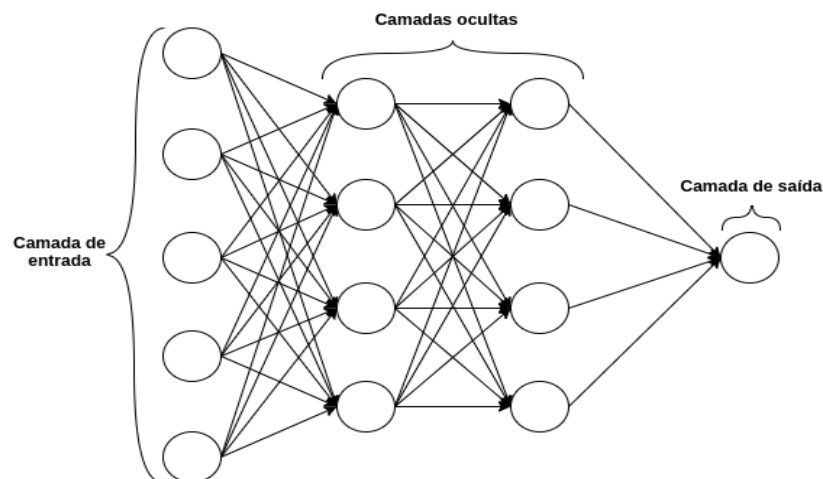
As redes neurais feedforward foram fundamentais no desenvolvimento inicial da inteligência artificial baseada em aprendizado de máquina e continuam sendo aplicadas em diversos domínios, especialmente quando os dados não possuem dependências temporais que exigiriam uma abordagem recorrente (ZHU et al., 2024).

Nas redes Neurais Feedforward (FNN), os dados caminham em uma única direção, não existindo ciclos, loopings, ou caminhos de volta esse tipo de rede neural tem grande utilização em tarefas que incluem, regressão reconhecimento de padrões e classificação. Como o gradiente descendente, e técnicas como retro propagação (back propagation) minimizam a função de erro e melhoraram a precisão da rede (FACURE, 2017a).

A arquitetura de uma Feedforward Neural Network é composta por várias camadas de neurônios interconectados, onde cada neurônio está ligado a todos os neurônios da camada seguinte. A primeira camada é chamada de camada de entrada,

a última camada é chamada de camada de saída e as camadas intermediárias são chamadas de camadas ocultas. Cada neurônio em uma camada recebe entradas dos neurônios da camada anterior, realiza um cálculo ponderado dessas entradas e passa o resultado para os neurônios da camada seguinte. Essa propagação de informações é feita de forma unidirecional, sem feedbacks ou loop. cada neurônio recebe uma função de ativação, para se ter o neurônio de saída. Esta função de ativação permite determinar a saída do neurônio(FACURE, 2017a), na figura 5 temos a arquitetura de FFN.

Figura 5 - Arquitetura rede neural FNN



Fonte: Coutinho - 2016

Diferente de outras arquiteturas, como as redes neurais recorrentes (RNNs) e as redes neurais convolucionais (CNNs), as feedforward não possuem memória interna ou capacidade de modelar dependências temporais nos dados. Sua estrutura é composta por múltiplas camadas de neurônios artificiais, cada um operando por meio de funções de ativação que introduzem não linearidades à rede, permitindo que ela aprenda padrões complexos (FLECK,2017).

## 2.7 Rede neural convolucional

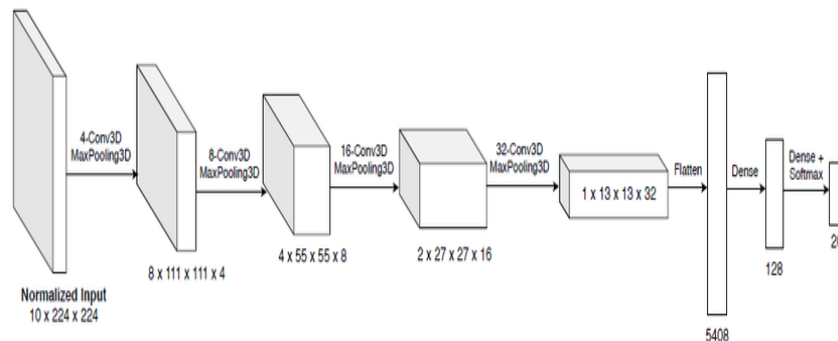
As Redes Neurais Convolucionais (CNNs) são um tipo de rede neural projetada especificamente para processar dados com uma estrutura de grade, como imagens, vídeos ou sinais temporais. Elas têm sido amplamente utilizadas em tarefas de visão computacional, como reconhecimento de imagens, detecção de objetos e

classificação, mas também em outros domínios, como processamento de linguagem natural para análise de dados sequenciais (AMARAL, 2021).

Uma Rede Neural Convolucional é um modelo de Aprendizado Profundo capaz de processar imagens, atribuir pesos e vieses a diferentes elementos e distinguir objetos com precisão. Comparada a outros algoritmos de classificação, uma CNN requer um pré-processamento significativamente menor. Enquanto métodos tradicionais exigem filtros criados manualmente, as CNN, por meio de treinamento adequado, aprendem a detectar características automaticamente (P. WANG et al., 2025a).

Sua arquitetura se assemelha ao padrão de conectividade dos neurônios no cérebro humano, sendo inspirada na estrutura do Córtex Visual. Os neurônios respondem apenas a estímulos dentro de uma área específica do campo visual, chamada de Campo Receptivo. Diversos desses campos se sobrepõem, permitindo cobrir toda a região visual como exemplifica a figura 6 (J. WANG et al., 2025).

Figura 6 - Arquitetura CNN



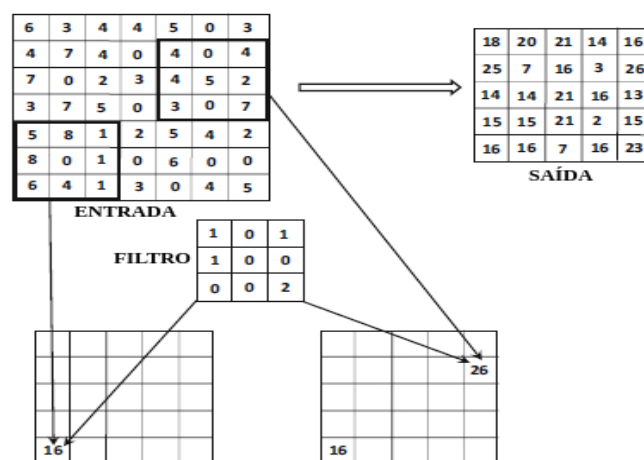
Fonte: Resende – 2019

Uma CNN consegue identificar e interpretar padrões espaciais e temporais em uma imagem por meio da aplicação de filtros específicos. Sua arquitetura é altamente eficiente, ajustando-se melhor ao conjunto de dados devido à diminuição do número de parâmetros e à reutilização dos pesos. Isso significa que, com o treinamento adequado, a rede pode aprimorar sua compreensão da complexidade da imagem, tornando a análise mais precisa e refinada (FLECK , 2017).

A camada convolucional é o núcleo de uma CNN. Ela aplica filtros (kernels) sobre os dados de entrada (geralmente uma imagem) para extrair as características que precisam ser estudadas (P. WANG et al., 2025b).

O filtro nada mais é que uma matriz que passa sobre a imagem de entrada e realiza operações de convolução, ou seja, ele faz uma multiplicação ponto a ponto entre os valores da imagem e os valores do filtro e soma o resultado, gerando uma "imagem convolucionada". Este filtro se move sobre a entrada com um deslocamento fixo e captura características como bordas, texturas e formas. Na figura 7 temos um exemplo de um processo de convolução 3x3 com uma entrada 7x7 (ZHANG et al., 2019).

Figura 7 - Processo de convolução

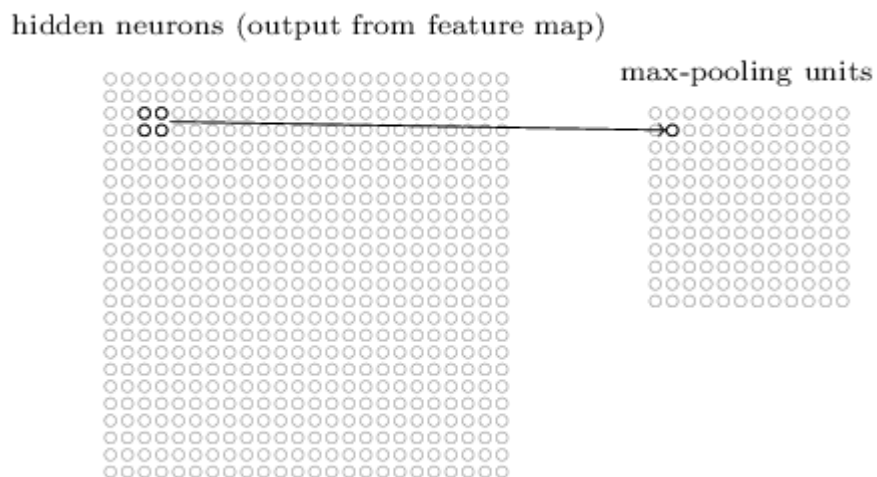


Fonte: Rallabandi - 2023

Após a aplicação dos filtros, o resultado é uma série de mapas de características. Cada mapa de características corresponde às ativações de um filtro específico, mostrando quais padrões foram detectados na entrada, então, diferentes filtros podem detectar características distintas, como bordas horizontais, verticais, curvas, etc (ZHANG et al., 2019).

A camada de pooling é usada para reduzir a dimensionalidade dos mapas de características, o que ajuda a diminuir a complexidade computacional e a evitar o overfitting. O pooling mais comum é o max pooling, que extrai o valor máximo de uma janela de tamanho fixo (por exemplo, 2x2) ao longo do mapa de características. Isso mantém as informações mais relevantes, reduzindo a resolução dos dados como ilustrado na figura 8 (LIU et al., 2023).

Figura 8 - Max pooling



Fonte: Rallabandi - 2023

Depois de várias camadas convolucionais e de pooling, as CNNs costumam ter uma ou mais camadas totalmente conectadas. Nessa etapa, todos os neurônios estão conectados a todos os neurônios da camada anterior, assim como em uma rede neural tradicional, essas camadas são responsáveis pela tomada de decisão com base nas características extraídas, produzindo a saída final da rede, como a classificação de uma imagem em diferentes categorias (LIU et al., 2023).

Cada camada convolucional geralmente é seguida por uma função de ativação, como a, ReLU (Rectified Linear Unit), que introduz não-linearidade e permite à rede aprender padrões mais complexos.

As CNNs são treinadas usando o algoritmo de back propagation, que ajusta os pesos dos filtros para minimizar a diferença entre a saída real da rede e a saída desejada. Isso é feito através de uma função de perda, e os parâmetros da rede são ajustados usando o método de gradiente descendente., tornando o modelo mais eficiente e menos suscetível ao overfitting (FLECK, 2017).

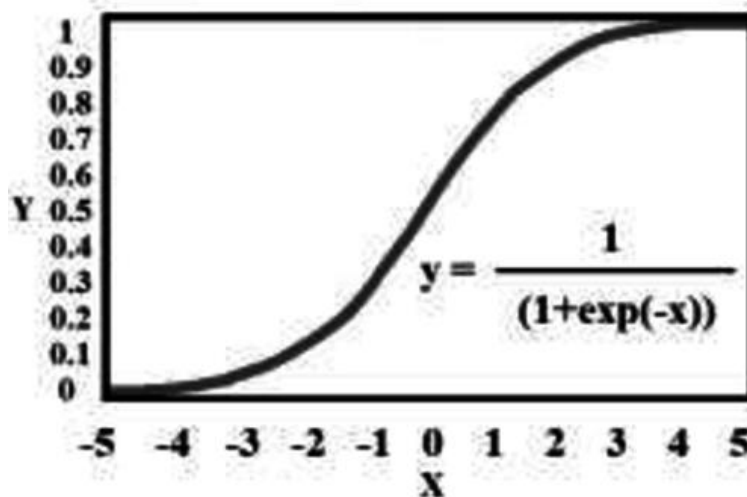
## 2.8 Função de ativação

A função de ativação introduz não-linearidades na rede neural, é uma função matemática que permite que ela aprenda relações complexas entre os dados de entrada e as saídas. Existem várias funções de ativação comumente utilizadas, como a função sigmoide, a função tangente hiperbólica e a função ReLU (Rectified Linear

Unit). Cada função de ativação tem suas próprias características e é escolhida com base no problema específico que está sendo abordado (MOLEK ;ALIJANI, 2025).

A função sigmoide (ou função logística) é uma das primeiras funções de ativação utilizadas. Ela mapeia qualquer valor real para o intervalo, sua função é binarizar os dados, ou seja, deixá-los entre o espaço de 0 e 1 e. tem seu formato em S. É frequentemente usada em camadas de saída para problemas de classificação binária, onde a saída representa a probabilidade de pertencer a uma classe. Essa função é muito utilizada pois os neurônios biológicos trabalham de forma binária, fazendo ou não fazendo, essa função é uma excelente forma de expressar essa situação como ilustrado na figura 9 (FACURE, 2017b).

Figura 9 - Função sigmoide

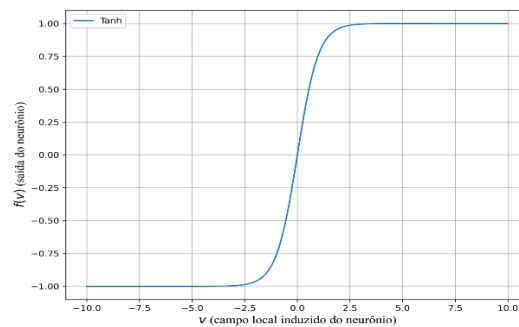


Fonte: Ferreira - 2016

A função tangente hiperbólica é semelhante à sigmoide, mas mapeia valores para o intervalo (-1, 1). Ela também é usada em camadas intermediárias e de saída. Se as funções de ativação de cada camada forem lineares, toda a rede seria equivalente a uma única camada sendo uma transformação linear.

O ponto essencial é que funções de ativação não lineares são indispensáveis para que redes neurais tenham múltiplas camadas com capacidades significativas. Um exemplo simples de função não linear seria a parábola  $Y=X^2$ , frequentemente utilizada para modelar dados reais em diversas aplicações como na figura 10.

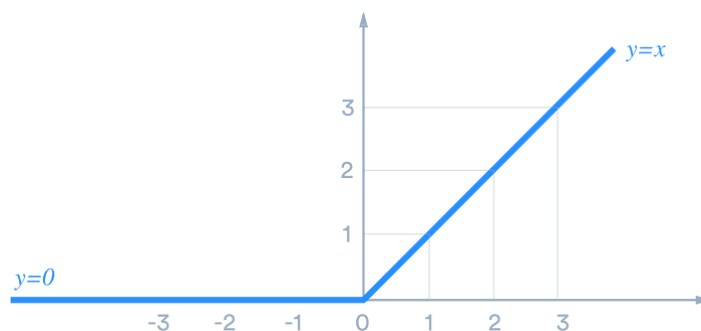
Figura 10 - Função tangente hiperbólica



Fonte: Ferreira - 2016

Uma das funções de ativação mais conhecidas e utilizadas é a ReLU (Rectified Linear Unit), significa unidade linear retificada e é um tipo de função de ativação. é definida como:  $y = \max(0, x)$ . Similar às demais funções de ativação, ela adiciona uma característica de não linearidade ao modelo, contribuindo para melhorar sua performance computacional. A função ReLU retorna o maior valor entre sua entrada e zero, para valores positivos de entrada, a saída equivale ao próprio valor da entrada. Já para valores estritamente negativos, a saída é igual a zero. sua eficácia na superação do problema do gradiente desaparecimento a tornaram uma escolha comum, na figura 11 conseguimos visualizar o gráfico da equação (PARISI et al., 2022).

Figura 11 - Função ReLu



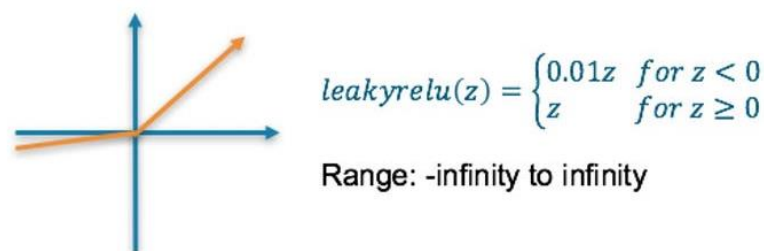
Fonte: Rallabandi 2023

A ReLU é uma função de ativação que soluciona o problema do gradiente de desaparecimento, tornando o treinamento de redes neurais profundas mais eficiente, ela evita a convergência dos gradientes a zero, algo comum em funções como

sigmoide e softmax, e gera ativações esparsas ao retornar zero para entradas negativas, otimizando a computação. Isso permite que redes sejam escaladas para múltiplas camadas sem sobrecarregar a carga computacional, fazendo da ReLU uma escolha padrão em modelos de aprendizado profundo (THEODORIDIS, 2020; XU et al., 2020).

Na figura 12 temos a ilustração da equação da A Leaky ReLU, que é uma variação da ReLU que permite um pequeno gradiente para valores negativos. Isso ajuda a evitar neurônios “mortos” ou seja quando os valores de  $x$  são positivos ela se torna como a função ReLU retornando a  $x$ , quando os valores de  $x$  são negativos a função retorna a entrada com um pequeno valor negativo (PARISI et al., 2022; THEODORIDIS, 2020).

Figura 12 - Função ativação ReLu



Fonte: Rallabandi - 2023

A função softmax é usada na camada de saída para problemas de classificação multi-classe. Ela normaliza as saídas para formar uma distribuição de probabilidade. Essa função é utilizada em redes neurais voltadas para tarefas de classificação. Sua principal finalidade é transformar as saídas da rede em probabilidades associadas às classes predefinidas. Sem essa função, os valores resultantes dos neurônios seriam apenas números, onde o maior indicaria a classe predominante. Um aspecto importante a destacar é que, diferentemente de outras funções de ativação, o cálculo da softmax considera a relação entre múltiplos neurônios de saída, tornando o processo dependente das interações entre eles (WANG et al., 2018).

A escolha da função de ativação depende do problema e da arquitetura da rede, não existe fórmula exata então testar formas diferentes e suas variantes é amplamente recomendado a função de ativação pode afetar o desempenho da rede, e é importante adaptá-la ao contexto específico (MOGUL et al., 2025).

O backpropagation calcula o gradiente da função de perda (ou erro) em relação aos pesos da rede. Esse gradiente indica a direção e magnitude da mudança necessária nos pesos para minimizar a perda. O método do gradiente descendente é usado para atualizar os pesos. Ele segue a direção oposta ao gradiente, ou seja, ajusta os pesos na direção que reduz a perda, durante o treinamento, o backpropagation propaga o erro da camada de saída para as camadas anteriores. Cada camada contribui para o erro total. Os pesos são ajustados iterativamente usando a taxa de aprendizado (learning rate). A taxa de aprendizado controla o tamanho dos passos na direção do gradiente. O processo de atualização dos pesos é repetido várias vezes (épocas) até que a rede atinja um estado de convergência, onde a perda é minimizada. O backpropagation também leva em consideração as funções de ativação em cada camada. Essas funções introduzem não-linearidades na rede, permitindo que ela aprenda relações complexas nos dados (BERGMANN, 2024).

### **3 REFERÊNCIAL TEÓRICO**

Este capítulo apresenta os fundamentos teóricos abordando conceitos e princípios e estudos relacionados ao tema da soldagem. O referencial teórico tem como objetivo contextualizar o desenvolvimento do trabalho, destacando os aspectos históricos, técnicos e científicos que envolvem o processo de soldagem, bem como suas aplicações na indústria.

Inicialmente, é apresentado o histórico da soldagem, seguido da descrição dos principais processos e classificações, além dos aspectos de qualidade relacionados à prática. Por fim, são abordadas as pesquisas recentes e as tendências tecnológicas pertinentes ao tema, estabelecendo a base conceitual necessária para a análise proposta neste estudo.

#### **3.1 Histórico da soldagem**

Segundo (MARQUES, 2005) a soldagem se iniciou na antiguidade, a milhares de anos e sempre evoluindo ao longo do tempo. caminhando com as civilizações, onde as mesmas sempre estão procurando uma forma mais eficiente de unir os materiais de forma mais eficiente, e sempre garantindo as mesmas propriedades físicas e químicas, sem alteração da junta soldada (ZIEDAS, 2021).

Por volta de 3000 antes de cristo, na idade do bronze, as pessoas já uniam os metais aquecendo os mesmos até sua fusão. Foram encontradas evidências arqueológicas, além disso foram encontradas evidencias que mostram a prática da soldagem a martelo, onde metais aquecidos eram unidos por marteladas, ou seja, por pressão.

Já em torno de 1200 A.C. durante a idade do ferro, os ferreiros começaram a unir peças de metal com aquecimento e martelamento para produzir armas ferramentas e joias. Na idade média a soldagem por forjamento, foi bem aprimorada onde os ferreiros começaram a produzir armaduras espadas e outros equipamentos de metal, os ferreiros começaram a se tornar os especialistas em moldar e unir metais (JUNIOR et al, 2021).

Entre os séculos 18 e 19 começaram a existir descobertas científicas, na ciência e tecnologia dos materiais principalmente durante a revolução industrial com o aumento da utilização do aço e da fundição de metais, e isto abriu caminho para

novas metodologias de soldagem, introduzindo a soldagem a gás, ou método oxi gás, e este método foi amplamente utilizado, permitindo a soldagem utilizando a chama quente (JUNIOR et al, 2021).

No final do século 19 a soldagem por arco elétrico teve seu surgimento, a mesma foi inventada pelo russo Nikolay Bernardos (1881), a este engenheiro russo foi atribuída a invenção da soldagem por arco elétrico, que envolve o uso de uma corrente elétrica para derreter metais e unir peças, atualmente a soldagem a arco elétrico se tornou uma das mais utilizadas na indústria moderna.

Já no século XX, como é de nosso conhecimento as grandes guerras influenciaram diretamente a produção industrial, neste período a demanda por tanques navios e aviões em massa impulsionou o uso da soldagem em larga escala, logo precisou-se aprimorar as técnicas de soldagem por arco elétrico e a solda oxiacetilênica (JUNIOR et al, 2021).

A soldagem por eletrodo revestido se consolidou no início do século XX utilizando o eletrodo revestido, tanto como fonte de calor como também como metal de adição, este processo é amplamente conhecido pela sua eficiência e aplicabilidade em diversos segmentos além de poder realizar soldagem com um pequeno equipamento.

Com o passar dos anos novas técnicas de soldagem surgiram, o processo de soldagem MIG que foi desenvolvido na união soviética em 1930 já o processo MAG foi desenvolvido na década de 50, essa técnica utiliza um gás de proteção para realizar a proteção da poça de fusão e evitar a contaminação da junta soldada durante a soldagem, assim permitindo unir metais mais leves como alumínio (ARQUES, 2005).

Atualmente o processo MIG/MAG é o preferido pela indústria devido a sua alta taxa de deposição de material, e com o passar do tempo desde seu surgimento até os dias de hoje os equipamentos passaram por uma grande modernização, ficando cada vez mais leve.

Logo depois da segunda guerra mundial, foi introduzido o processo de soldagem TIG, este processo se originou pela necessidade de soldar materiais como magnésio e alumínio na indústria de aviação e aero espacial, atualmente esta técnica é muito utilizada para trabalhos de alta precisão e em tubulações (JUNIOR et al, 2021).

Em 1950 temos o início da utilização da soldagem a plasma, onde um jato de plasma em alta temperatura é utilizado para soldar e cortar metais com alta precisão, essa alternativa do plasma surge como um aprimoramento do processo de soldagem Tig.

No século XX também temos a utilização da soldagem a Laser, esta técnica é muito utilizada na indústria automotiva e aeroespacial e em dispositivos médicos.

um dos processos de soldagem mais recente é a soldagem por fricção onde a mesma utiliza o calor gerado pelo atrito para unir os materiais.

Neste breve histórico podemos verificar a evolução da soldagem, e já no seu futuro atual podemos já ver a utilização de robôs e sistemas automatizados e embarcados, além do desenvolvimento de soldagem a frio e em ambiente sem gravidade, isto indica que o futuro da soldagem sempre estará em constante evolução, juntamente com a evolução das civilizações.

### **3.2 Processos de união dos materiais**

Segundo (MARQUES, 2005) os métodos de união são divididos em forças Inter atômicas e intermoleculares, ou seja, temos uniões que podem ser feitas por parafusos ou rebites e a força com que essa união irá se romper é a força de cisalhamento do parafuso ou rebite.

Ainda segundo (MARQUES, 2005), temos outro tipo de método de união que são baseadas nas ligações atômicas e ligações intramoleculares, onde temos ligações de Vanderwalss e ligações atômicas essas ligações são realizadas através dos átomos onde os materiais são posicionados de forma a se obter uma ligação química entre eles, como exemplo temos a soldagem a brasagem e a colagem.

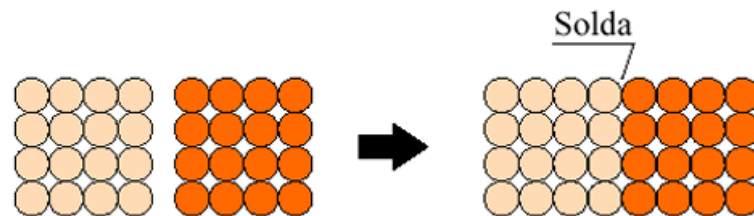
Segundo a Associação Americana de Soldagem (American Welding Society) a soldagem se define como:

processo de união de materiais usados para obter a coalescência (união) localizada de metais e não metais, produzida por aquecimento até uma temperatura adequada, com ou sem a utilização de pressão e/ou material de adição (AMERICAN WELDING SOCIETY, 2004).

A estrutura da peça soldada pode ser considerada como um empilhamento de átomos, ou seja, um arranjo cristalino, os átomos estão na sua forma de energia mínima.

Logo se encostássemos um juntamente com o outro conforme como se fossem dois cubos de gelo colocados um do lado do outro conforme a figura 13 (FAGUNDES, 2018).

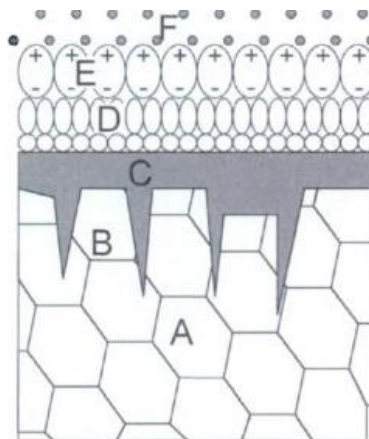
Figura 13 - Formação teórica da solda pela superfície



Fonte: Soldagem fundamentos e tecnologia - 2009

Os materiais metálicos são formados por arranjos cristalinos, e em sua superfície existe uma rugosidade a ser considerada, também existe o óxido proveniente da oxidação que é a reação do oxigênio com os metais então, mesmo que esse material esteja extremamente polido essa rugosidade existe, e isso impede a ligação entre os átomos, além disso temos os fatores externos como a poeira, umidade, oxidação, sendo assim a ligação química entre os átomos fica incompleta conforme a representação na figura 14 (CALLISTER, W. D., 2002).

Figura 14 - Representação de uma estrutura metálica em contato com o ar



Fonte: Soldagem fundamentos e tecnologia - 2009

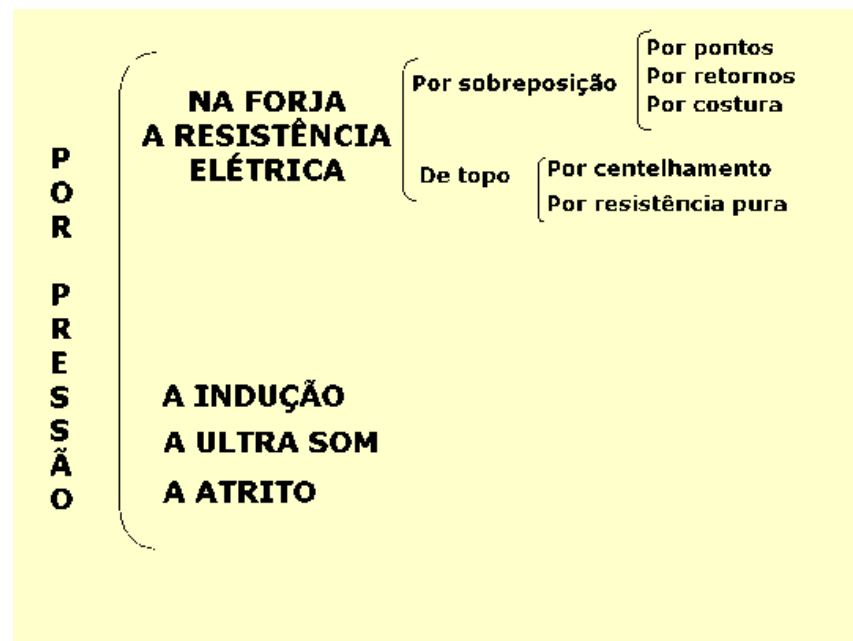
Tendo em vista as dificuldades que temos em realizar uma solda em um material, basicamente temos duas formas de realizar a soldagem, ou por fusão ou por pressão. Conforme as ilustrações da figura 15 e 16 (MARQUES, 2005)

Figura 15 - Classificação dos processos de soldagem por fusão



Fonte: Freitas - 2025

Figura 16 - Classificação dos processos de soldagem por pressão



Fonte: Freitas - 2025

Na soldagem por pressão ou deformação, como o próprio nome já nos faz entender vai existir uma pressão a qual vai ser adequada a cada tipo de material e processo.

Essa força é aplicada e a mesma vai realizar a aproximação dos átomos em uma ordem onde seu raio atômico seja zero, e fazer a união do material em alguns casos pode existir o aquecimento do material para que o material ofereça uma menor resistência assim necessitando de um menor esforço ou para auxiliar na fusão do material como na figura 17 (MESSLER JR, 2024)

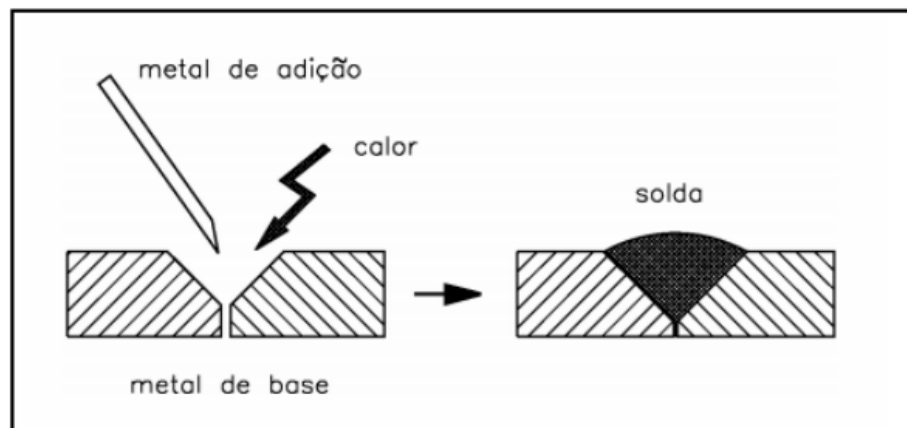
Figura 17 - Soldagem a quente por pressão



Fonte: Aventa - 2017

O processo de soldagem por fusão baseia-se na aplicação de calor ao material que será feita a união até a fusão dele. Dentre as fontes de calor temos as fontes por chama e por arco elétrico nestes processos temos o metal de base e o metal de adição ou somente o metal de base, sendo que o metal de base se entende pela peça principal e o metal de adição será o material que vai ser adicionado e assim formando o cordão de solda, no caso da soldagem por fusão a superfície da peça será retirada, e quando o metal se solidificar a solda ocorrerá (KALAISELVAN et al., 2021).

Figura 18 - Soldagem a quente por fusão



Fonte: IFSC - 2015

### 3.3 Tipos de soldagem por fusão

Entre os processos de soldagem por fusão, temos a Soldagem a arco, onde estão compreendidos a soldagem por arco voltaico, arco metálico, MIG/MAG, TIG, Plasma, Arco submerso. Soldagem a gás, onde se compreendem soldagem oxiacetileno, soldagem ar acetileno e soldagem oxi-hidrogênio. Soldagem por resistência, onde se compreendem soldagem Butt, Spot, projeção, Seam e Percussão. Soldagem Térmica. Soldagem solida onde se compreendem, solda por atrito, solda por ultrassom, solda por difusão e solda por explosão. Soldagem não convencional onde se compreendem feixe de elétrons e soldagem laser (HAQUE, 2023; MESSLER JR, 2024).

#### 3.3.1 Soldagem por arco elétrico

O arco elétrico foi descoberto em 1801, mas não se tinha tecnologia para estabilidade do arco elétrico, logo o processo de soldagem por arco elétrico veio ser realmente utilizado em grande escala na 1ª guerra mundial (MARQUES, 2005).

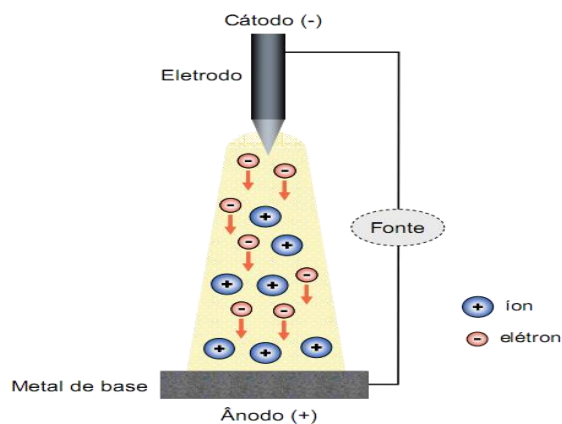
Após isso passamos pela revolução industrial onde o processo de soldagem foi amplamente utilizado reduzindo os tempos de produção, e dando um verdadeiro salto tecnológico na história. O arco elétrico é a fonte de calor mais utilizada pela indústria.

de uma forma geral, ele ocorre no meio gasoso, onde existe uma diferença de potencial entre dois condutores, ou seja, o polo positivo e o polo negativo.

É utilizado para materiais metálicos devido ao alto poder de fusão do arco elétrico um relativo baixo custo de implementação (SANTOS e ROCCA, [n.d]).

O arco elétrico consiste em fluxo contínuo de elétrons que vem passando pelo cabo de energia até chegar na outra extremidade causando um curto-circuito e gerando calor suficiente para fundir o material de base e de adição

Figura 19 - Geração do arco elétrico



Fonte: Infosolda - 2018

A soldagem feita pelo arco elétrico consiste na fusão do metal base com o metal de ação, onde o metal base é a peça a ser soldada e o metal de adição o material a ser adicionado na peça, levando em consideração as mesmas características físicas e químicas do metal de adição (SANTOS e ROCCA, [n.d]).

As máquinas que efetuam a soldagem por arco elétrico são: transformador, Retificadora, Inversora e gerador. onde cada uma possui uma característica em relação ao processo.

A geradora de solda como o próprio nome já diz gera a corrente elétrica a partir de um gerador de energia, é um equipamento de alto custo, muito utilizado em soldas de campo onde a rede elétrica não chega, pode realizar todos os processos de soldagem tem em seu princípio a transformação da energia térmica da combustão em energia elétrica(ESAB, [n.d.]; MARQUES, 2005)

Figura 20 - geradora de solda



Fonte: Infosolda - 2018

A inversora de solda realiza soldagem dos processos do eletrodo revestido e do processo TIG. A grande característica das inversoras são o seu tamanho reduzido que possibilitam o operador trabalhar em alturas carregando o equipamento que pesa menos de 2kg, além disso com a modernização das placas de circuito eletrônico esse equipamento possui uma grande estabilidade do arco elétrico proporcionando uma solda com excelente qualidade e um baixo custo do equipamento.(ESAB, [n.d.]

Figura 21 - Inversora de solda



Fonte: Infosolda - 2018

A retificadora de solda é muito utilizada no meio industrial para soldagens mais robustas e pesadas, manutenções em siderúrgicas, caldeiraria pesada e leve, este equipamento pode ser encontrado desde máquinas mais leves que podem ser transportadas até retificadoras estacionárias, este equipamento produz uma excelente

soldabilidade, mas em contrapartida seu consumo de energia é alto além do tamanho do equipamento dificultar a mobilidade do mesmo (BALMER 2025).

Figura 22 - Retificadora de solda



Fonte: Infosolda - 2018

O transformador de solda transforma a energia da rede elétrica de corrente alternada para corrente contínua, este equipamento é um equipamento relativamente barato é muito utilizado em serralherias pela sua baixa potência.(ESAB, [n.d.])

Figura 23 - Transformador de solda



Fonte: Infosolda 2018

### 3.3.2 Soldagem pelo processo eletrodo revestido

Segundo (BAGHEL, 2022) a soldagem no processo eletrodo revestido é a mais econômica e versátil para soldar metais, sendo assim uma das mais utilizadas.

Na soldagem por eletrodo revestido equipamento é utilizado uma fonte de energia (retificadora, inversora, transformadora ou geradora). acoplada a esta fonte de energia estão os cabos elétricos onde a energia vai transitar do positivo para o negativo entre o alicate porta eletrodo e a garra de aterramento.(FAGUNDES, 2018).

Segundo (AFZAL et al., 2024) a soldagem do eletrodo revestido é conhecida pela sua versatilidade facilidade de uso e por sua adaptabilidade entre corrente alternada e continua.

A especificação do porta eletrodo para soldagem vai depender do fator ergonômico e principalmente da corrente de trabalho que também vai definir a especificação dos cabos elétricos e da garra de aterramento (MARQUES, 2005).

Figura 24 - Porta eletrodo e garra de aterramento



Fonte: Infosolda 2018

O eletrodo é responsável por entrar em curto circuito com o metal de adição e assim criar a diferença de potencial, onde é iniciado o curto-circuito e a geração de calor para iniciar a poça de fusão e a soldagem., o eletrodo tem as mesmas características físicas e químicas do metal de base, as partes do eletrodo são a alma que é o metal de adição e sua haste metálica a qual entra em contato com o porta eletrodo não tem o revestimento (MESSLER JR, 2024).

Já o revestimento que é um material isolante tem 3 características principais que são controlar o fluxo dos elétrons , controlar a taxa de resfriamento da poça de

fusão e de promover a atmosfera de proteção da poça de fusão quando o mesmo está realizando a soldagem (AFZAL et al., 2024; MARQUES, 2005)

Figura 25 - Partes do eletrodo



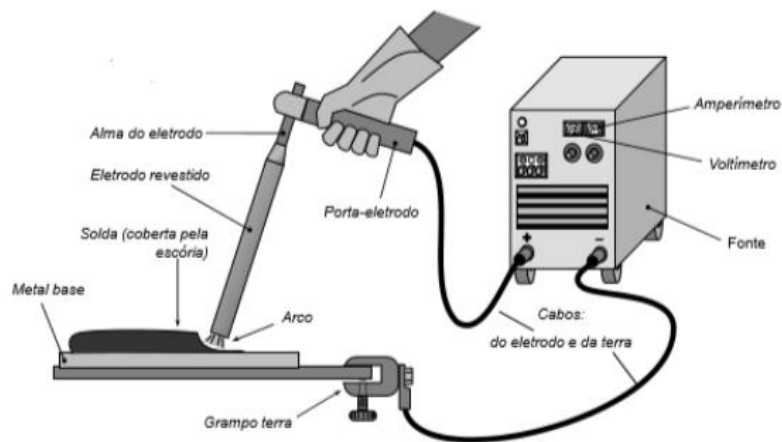
Fonte: ESAB., (2016)

Os tipos de revestimentos do eletrodo são escolhidos em virtude da polaridade da solda, e em relação ao material a ser soldado, o revestimento é responsável em direcionar o fluxo dos elétrons e sua queima gera uma fumaça a qual chamamos de atmosfera de proteção onde os gases vão proteger a poça de fusão da ação do oxigênio além de controlar a taxa de resfriamento (Marques, 2005).

A escoria que é formada pela queima do revestimento, também tem a finalidade de controlar a taxa de resfriamento da poça de fusão, e é um resíduo do processo de soldagem por eletrodo revestido, a escoria também protege a poça soldada e ajuda a não ter contaminantes do ambiente na solda (MAHAJAN e CHHIBBER, 2020).

Abaixo temos uma figura representando o processo de soldagem do eletrodo revestido:

Figura 26 - Esquema soldagem eletrodo revestido

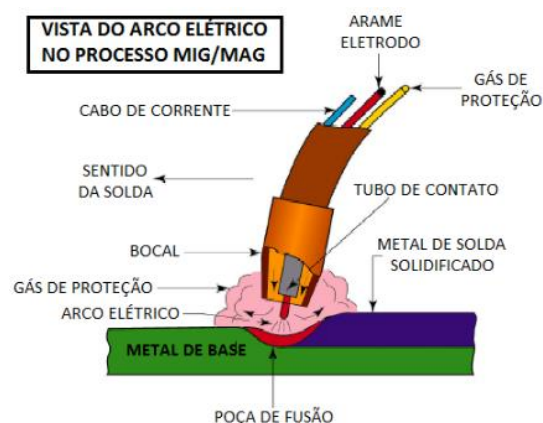


Fonte: ESAB 2016

### 3.3.3 Soldagem pelo processo MIG/MAG

A soldagem mig/mag é muito utilizada na indústria pela sua alta taxa de deposição de material, entre os processos de soldagem é o que possui a maior taxa de deposição e é um processo semiautomático e que também é muito fácil de ser automatizado além de não necessitar de muita habilidade do operador para operar o equipamento e executar a soldagem. Pois o mesmo só precisa segurar a tocha na inclinação e manter a distância do bico de contato em relação a peça (KAÇAR e KÖKEMLI, 2005). Na figura 28 temos a vista do arco elétrico no processo Mig/Mag.

Figura 27 - Arco elétrico na soldagem mig/mag



Fonte: ESAB 2016

Este processo utiliza uma fonte de energia para gerar o arco elétrico, neste processo o arame é o consumível e ele vai gerar a diferença de potencial entre a tocha e a garra de aterramento do metal base, gerando o curto-circuito para ser gerado para fundir a o metal de base e de adição. Sua alta taxa de deposição é possível pelo metal de adição ser comercializado em bobinas de em arame tubular e arame solido que começam a partir de 1kg e podem chegar até300kg(MARQUES, 2005)

O processo é descrito semi automático pois a alimentação do arame de solda é continuo , essa alimentação é feita por roldanas dentro do equipamento conforme a figura 29 (MESSLER JR, 2024).

Figura 28 - Dispositivo alimentação arame de solda



Fonte: DBC oxigênio 2014

Na figura 30 temos uma bobina de arame do processo Mig, podemos verificar que a quantidade de material na bobina pode soldar por muito tempo as bobinas podem variar de 1kg a 300kg. A figura apresenta um dispositivo utilizado para o desenrolamento controlado de bobinas de fio metálico, empregado em processos industriais que demandam alimentação contínua e organizada de materiais lineares. O equipamento é composto por uma base cilíndrica que suporta a bobina principal de fio, a qual se encontra acondicionada de forma estável sobre um tambor central. Em torno da bobina, há uma estrutura transparente que funciona como elemento de contenção, impedindo que o fio se desenrole de maneira irregular ou provoque enrosocos durante a operação.

Na região superior, observa-se uma tampa cônica metálica, dotada de uma abertura lateral que permite o acesso visual e físico ao interior do conjunto. O fio é guiado por um eixo vertical central, que conduz sua saída de forma linear e reduz o atrito, assegurando que o desenrolamento ocorra com mínima interferência mecânica. Uma alavanca lateral fixa ao topo do dispositivo possibilita ajustes operacionais, provavelmente relacionados à tensão ou ao travamento da bobina.

O conjunto é projetado para manter a organização, segurança e estabilidade do fio durante o processo de utilização, contribuindo para a eficiência operacional e para a redução de falhas decorrentes de torções, laços ou impedimentos no fluxo de alimentação do material.

Figura 29 - Bobina arame de solda com 300kg

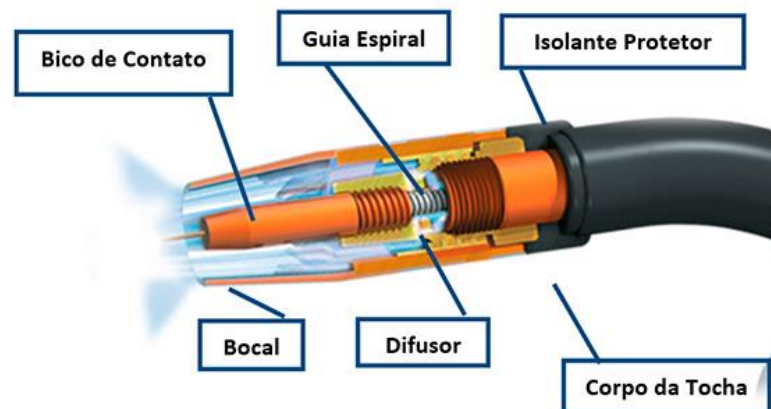


Fonte: DBC oxigênio 2014

Outro grande diferencia da soldagem mig/mag é sua tocha que deixa o processo semiautomático, conforme o operador aperta o gatilho o arame de solda entra em contato com o metal de base aí se inicia o processo de soldagem, quando o botão é desacionado a soldagem imediatamente é descontinuada. E a soldagem se encerra (CHEN et al., 2024).

O mecanismo da tocha também é responsável pela liberação do gás de proteção, que é responsável pela proteção da poça de fusão conforme a figura 31.

Figura 30 - Vista explodida tocha mig/mag



Fonte: Sumig 2014

No processo de soldagem mig/mag temos uma solda limpa e bem acabada sem a presença de escória, isto é possível devido à proteção da poça de fusão ser realizada por gases de proteção, esses gases podem ser ativos ou inertes, e daí que vem a nomenclatura da solda, quando o processo trabalha com gás ativo, ou seja, o gás vai reagir com a poça de fusão, a nomenclatura do processo se chama Mag (metal active gas), quando o gás que protege a poça de fusão é um gás inerte a nomenclatura da solda é Mig (MODENESI et al., 2012).

Segundo (MODENESI et al., 2012) diferente do processo do eletrodo revestido aqui se utiliza um arame sólido como metal de adição, esse arame pode vir em bobinas de 15 a 200kg e temos uma tocha que faz a liberação desse arame, a proteção da poça de fusão é realizada por um gás inerte (processo mig) ou por um gás ativo (processo mag) (MESSLER JR, 2024; MODENESI et al., 2012).

A função do gás de proteção no processo Mig/Mag é não deixar que as impurezas do ambiente contaminem a solda, os gases de proteção também contribuem para penetração da junta soldada, estabilidade do arco elétrico, composição química da solda e soldabilidade.

Os gases de proteção ativos são o dióxido de carbono, mistura de argônio e dióxido de carbono, e mistura de argônio, dióxido de carbono e oxigênio, a porcentagem dessas misturas varia bastante em relação ao que se espera em relação à junta soldada, a vantagem da utilização do dióxido de carbono é que ele tem um custo mais barato em relação aos outros gases, em contrapartida ele proporciona mais respingos na solda (NASCIMENTO et al., 2012).

Os gases inertes utilizados na soldagem mig são o argônio e o hélio sua utilização fica restrita a metais não ferrosos e na maioria das vezes esses gases são misturados com outros gases devido ao seu alto custo, em contra partida com os gases inertes o arco elétrico fica mais instável e praticamente não existe respingos na solda (RITA, 2020), abaixo verificamos os tipos de materiais em relação ao tipo do gás de proteção.

Tabela 1 - Material em relação ao Gás de proteção

| <b>Metal</b>                    | <b>Ar</b> | <b>He</b> | <b>Ar-He</b>       | <b>Ar-CO<sub>2</sub></b>                | <b>Ar-He-CO<sub>2</sub></b>        | <b>Ar-O<sub>2</sub>-CO<sub>2</sub></b> | <b>CO<sub>2</sub></b> |
|---------------------------------|-----------|-----------|--------------------|-----------------------------------------|------------------------------------|----------------------------------------|-----------------------|
| <b>Alumínio</b>                 | X         | X         | (25-75)            |                                         |                                    |                                        |                       |
| <b>Aços carbono</b>             |           |           |                    | (75-25)<br>(50-50)<br>(92-8)<br>(85-15) |                                    | (>90-<5-<10)                           | X <sup>(1)</sup>      |
| <b>Aços de alta resistência</b> |           |           |                    |                                         | (2,5-96-1,5)<br>ACIMA DE<br>14 MSG | (>90-<5-<10)<br>ATÉ<br>14 MSG          |                       |
| <b>Cobre</b>                    |           |           | (25-75)            |                                         |                                    |                                        |                       |
| <b>Aços inoxidáveis</b>         |           |           |                    | (75-25) <sup>(1)</sup>                  | (7,5-90-2,5)                       | (>90-<5-<10)                           |                       |
| <b>Ligas de Níquel</b>          | X         |           | (10-90)<br>(25-75) |                                         | (7,5-90-2,5)                       |                                        |                       |
| <b>Metais reativos</b>          | X         | X         | (25-75)            |                                         |                                    |                                        |                       |

Fonte: Elaborado pelo Autor 2025

Tabela 2 - Classificação do gás inerte ou ativo

| <b>Gás ou mistura</b>                 | <b>Comportamento químico</b> | <b>Aplicações</b>                                     |
|---------------------------------------|------------------------------|-------------------------------------------------------|
| Argônio (Ar)                          | inerte                       | quase todos metais (- aço)                            |
| Hélio (He)                            | inerte                       | Al, Mg, Cu e suas ligas                               |
| Ar + 20 a 50 % He                     | inerte                       | idem He (melhor que 100% He)                          |
| Nitrogênio (N <sub>2</sub> )          | inerte                       | Cobre e suas ligas                                    |
| Ar + 20 a 30 % N <sub>2</sub>         | inerte                       | idem N <sub>2</sub> (melhor que 100% N <sub>2</sub> ) |
| Ar + 1 a 2 % O <sub>2</sub>           | ligeiram. oxidante           | aços inóx e alg. ligas Cu                             |
| Ar + 3 a 5 % O <sub>2</sub>           | oxidante                     | aços Carb. e alguns b. liga                           |
| CO <sub>2</sub>                       | oxidante                     | aços Carb. e alguns b. liga                           |
| Ar + 20 a 50 % CO <sub>2</sub>        | oxidante                     | div. aços - transf. c. circ                           |
| Ar + CO <sub>2</sub> + O <sub>2</sub> | oxidante                     | diversos aços                                         |

Fonte: Elaborado pelo Autor 2025

A vazão do gás também é um parâmetro de extrema importância para junta soldada, a vazão do gás vai garantir que a solda fique isenta de porosidade, o valor ideal de sua vazão vai depender do material ambiente, ventilação e amperagem a ser utilizada, a regulagem da pressão é realizada pelos manômetros que ficam nos cilindros ou na linha de gás, um relógio regula a pressão existente no cilindro e o outro regula a vazão do gás conforme a figura 32.

Figura 31 - Manômetro



Fonte: DBC (2025).

Para controlar a vazão do gás, é utilizado um fluxômetro conforme figura 33, ele é colocado no bocal da tocha para ver se não existe vazamento ou queda de pressão na linha, para que não haja interferência na soldagem criando vazios ou porosidades

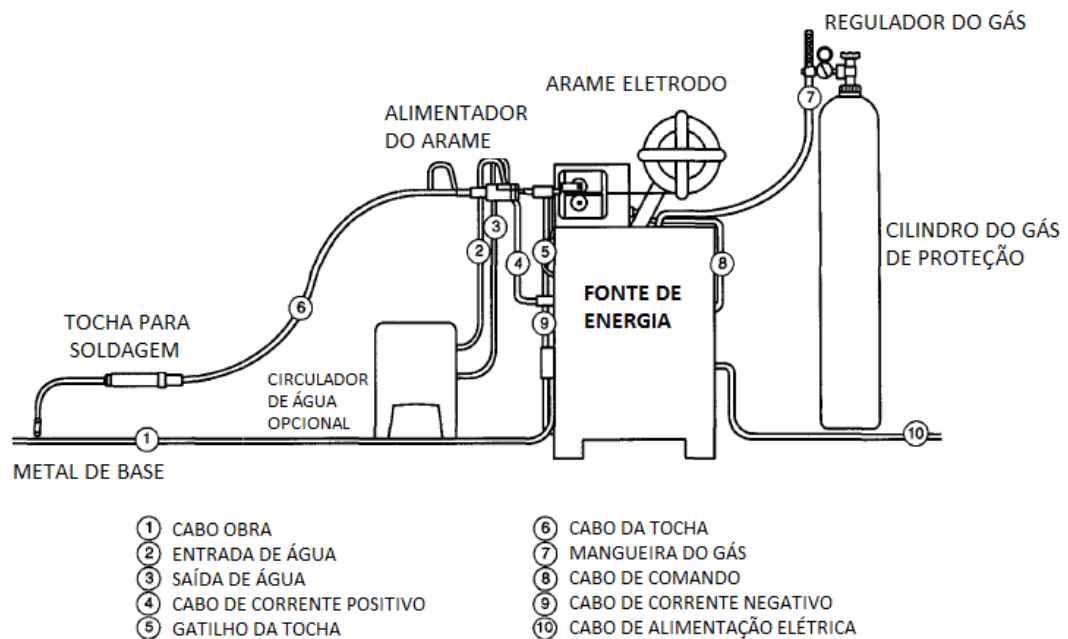
Figura 32 - Fluxômetro



Fonte: Ferramentas Gerais (2025)

Na figura 34 temos o esquema de um equipamento de soldagem Mig/Mag, com todos seus detalhes.

Figura 33 - Diagrama sistema de soldagem segundo AWS

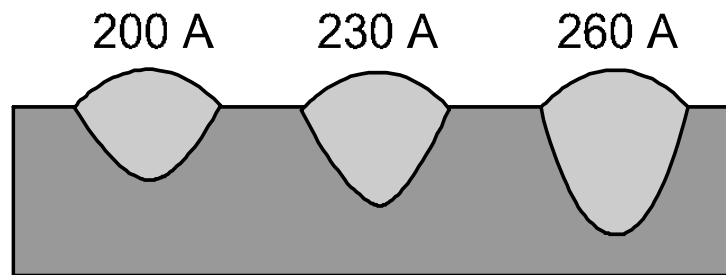


**DIAGRAMA DO SISTEMA PARA SOLDAGEM MIG/MAG - Conforme AWS**

Fonte: AWS 2010

Outro fator de extrema importância na soldagem Mig/Mag é a influência da corrente na penetração da solda e a velocidade do arame, basicamente o aumento da corrente aumenta a deposição de material em decorrência do aumento da velocidade do arame (SHARMA et al., 2022).

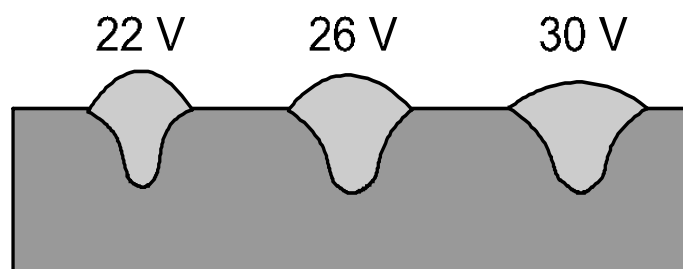
Figura 34 - Influência da corrente na penetração da solda



Fonte: Freitas 2018

Conforme podemos verificar na figura 36, a tensão de soldagem também influencia no perfil do cordão de solda, com o aumento do arco elétrico, uma maior área do metal de solda é aquecida resultando num cordão mais largo e mais baixo pelo aumento da fluidez da poça de fusão (FAN et al., 2024).

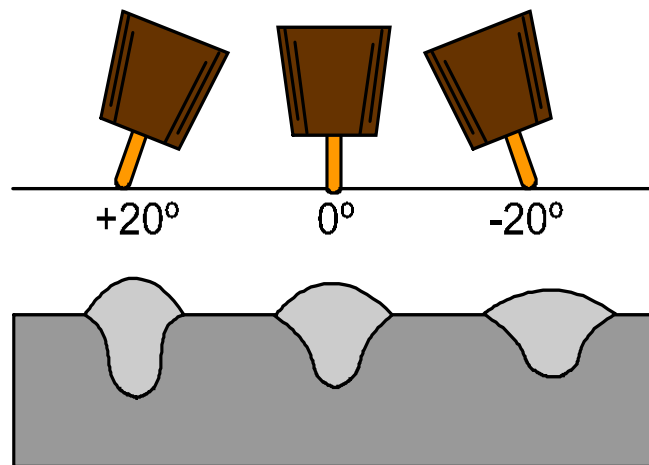
Figura 35 - Influência da voltagem na penetração da solda



Fonte: Freitas 2018

A inclinação da tocha também influencia no perfil do cordão de solda conforme a figura 37, quando a inclinação é positiva o arco elétrico atua diretamente sobre a poça de fusão aumentando a penetração, já quando a solda é efetuada no sentido contrário, ou seja, empurrando a solda o metal de base ainda está frio assim reduz a penetração da solda.

Figura 36 - Influência da corrente na penetração da solda



Fonte: Freitas 2018

#### 3.3.4 Soldagem pelo processo TIG

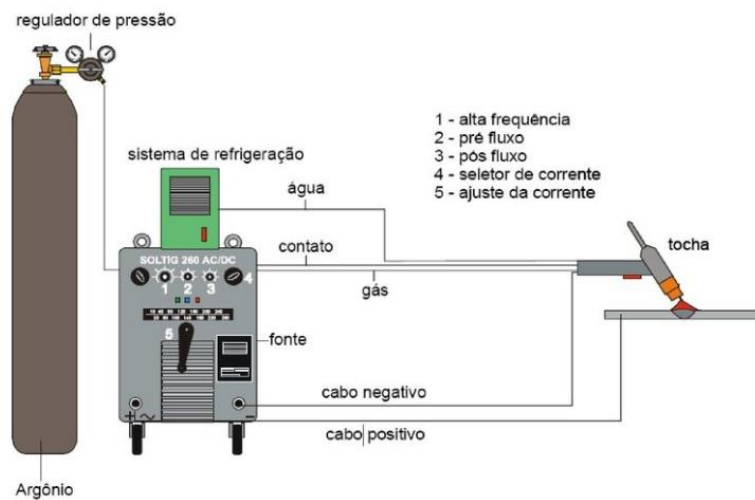
O processo de soldagem tig tem sua grande característica seu eletrodo de tungstênio, o mesmo dá o nome ao processo, TIG (tungstênio inert gás). É um consumível que sofre pouco desgaste na soldagem pois ele só precisa ser afiado quando toca no metal de base, caso não encoste na peça o mesmo se desgasta muito pouco, o tungstênio também torna o processo bastante versátil soldando a maioria dos materiais (MESSLER JR, 2024).

A soldagem Tig também é realizada pelo arco elétrico e o calor é gerado pela diferença de potencial entre o polo positivo e negativo que neste caso é pela ponta de tungstênio e a garra negativa, o tungstênio possui o maior ponto de fusão entre os metais 3600 graus devido ao ponto de fusão se alto ele pode soldar a maioria dos materiais (MARQUES, 2005).

O processo Tig tem um ótimo acabamento pois a proteção da poça de fusão é realizada com gases inertes hélio e argônio e mistura dos dois gases, este processo exige muita habilidade do operador, pois ele tem que controlar a tocha com o tungstênio e na outra mão ele tem que controlar a metal de adição (MARQUES, 2005).

Na figura 38 temos a ilustração do processo e suas particularidades.

Figura 37 - Ilustração processo Tig



Fonte: Silas - 2020

Para soldagem Tig precisamos escolher o tungstênio que vamos utilizar, eles são identificados por cores onde verificamos na figura 39, cada cor representa uma gama de material a ser atendida e os elementos de adição que estão junto do tungstênio além, disso o tungstênio tem de ser afiado, pois a afiação será responsável pelo direcionamento do fluxo de elétrons, a afiação correta também vai garantir o aumento da vida útil do eletrodo de tungstênio.

Figura 38 - Eletrodos de tungstênio



Fonte: Aventa - 2021

Eletrodo de tungstênio de cor vermelha possui na sua composição 2% de tório o qual é distribuída de maneira uniforme ao longo do comprimento do eletrodo Este é

o eletrodo mais utilizado na indústria, embora o Tório seja cancerígeno e na Europa esse eletrodo já é proibido (Toolbox, 2022). Ele garante uma excelente resistência à contaminação e, ao mesmo tempo, proporciona ao soldador uma fácil ignição e uma boa estabilidade do arco. É geralmente usado em aplicações no processo TIG DC negativo, em aço carbono, inox, ligas de níquel e titânio, mas também tem um bom desempenho em AC para soldagem de alumínio (ESAB, [n.d.]; MARQUES, 2005).

Eletrodo de tungstênio de cor azul é composto por 2% de lantânio, esse eletrodo é amplamente reconhecido por sua excelente performance, durabilidade, fácil ignição e estabilidade do arco, tanto em correntes baixas quanto em potências mais altas. Esse eletrodo é semelhante ao tório solda em DC, em aço carbono, inox, ligas de níquel e titânio e AC no alumínio (ESAB, [n.d.]; MARQUES, 2005).

Eletrodo de tungstênio de cor dourada com 1,5% de lantânio pode ser utilizado em corrente contínua (DC) com aço carbono, inox, ligas de níquel e titânio, e em corrente alternada (AC) com alumínio. Esse tipo funciona bem com configurações de corrente alternada e contínua (eletrodo negativo). Os eletrodos podem ser afiados ou arredondados, conforme a necessidade do projeto. Ele permite soldar aço utilizando uma fonte de energia de onda quadrada e proporciona partidas confiáveis e boa estabilidade do arco. Além disso é bastante escolhido como alternativa ao eletrodo de tório (ESAB, [n.d.]; MARQUES, 2005).

Eletrodo de tungstênio de cor branca possui 0,8% de zircônio com isso ele possui melhor resistência a corrosão e a contaminação, utilizado especialmente em correntes altas de soldagem e em alumínio em AC (ESAB, [n.d.]; MARQUES, 2005).

Eletrodo de tungstênio de cor marrom com 0,3% de zircônio é utilizado para soldar em corrente AC, o zircônio é um material resistente produz um arco estável e resistente a contaminação (ESAB, [n.d.]; MARQUES, 2005).

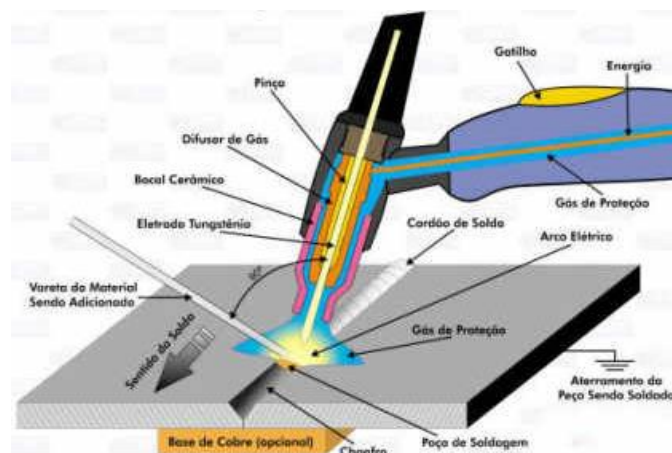
Eletrodo de tungstênio de cor cinza com 2% de cério esse material não possui radioatividade e apresenta um excelente desempenho na abertura de arco em baixa corrente, sendo a melhor alternativa ao eletrodo com tório para soldagem DC nessas condições. É amplamente utilizado para soldar tubos e chapas finas de aço inox, além de ser ideal para pequenos reparos em moldes de estamparia, peças menores em geral, cordões curtos e pontos de solda (ESAB, [n.d.]; MARQUES, 2005).

Eletrodo de tungstênio de cor roxa tem versatilidade devido a sua composição 1,5% Lantânio + 0,8% Zircônio + 0,8% Ítrio, que permite o uso em diversos tipos de

soldagem, sem restrições. A durabilidade é outro ponto forte desse eletrodo, pois o tungstênio ponta roxo apresenta um desgaste significativamente menor em comparação com outras ligas. A sua composição contribui para uma abertura de arco de melhor qualidade e facilita bastante a afiação da ponta(ESAB, [n.d.]; MARQUES, 2005).

A tocha de soldagem Tig faz a fixação do eletrodo de tungstênio através de uma pinça na tocha, existe um difusor para passagem do gás e um bocal cerâmico que resiste a altas temperaturas protege o eletrodo de tungstênio de contaminação e direciona o gás de proteção alguns modelos de máquinas possuem uma opção chamada lift arc a qual realiza a ignição do eletrodo sem encostar na peça evitando o desgaste da ponta de tungstênio. À liberação do gás também pode ser feita de forma automática ou manual dependendo do modelo o equipamento, conforme a ilustração da figura 40 (ESAB, n.d.; MESSLER JR, 2024).

Figura 39 - Ilustração processo Tig



Fonte: Messeler, 2024

As principais vantagens do processo de soldagem Tig são o controle do calor do processo pois o metal de adição é controlado pelo operador, a zona termicamente afetada é a menor dentre os processos, existe a possibilidade de soldar sem o metal de adição técnica chamada de caldeamento, a utilização de gases inertes não produz reação entre os materiais que estão sendo soldados assim não são gerados fumos metálicos nocivos aos operadores, a operação pode ser manual ou automatizada, e o processo não necessita de acabamento posterior após a soldagem, em contra partida

o processo de soldagem tig é o processo que exige a maior habilidade do operador e o que tem o maior custo (LIU et al., 2023; MESSLER JR, 2024; J. WANG et al., 2025).

### **3.4 Defeitos na junta soldada**

Os defeitos ou descontinuidades de soldagens são descontinuidades que existem na estrutura do material deixando a junta soldada frágil, é uma interrupção na estrutura esperada, ou seja, a falta da homogeneidade das características físicas da solda, assim essa solda não suportará a carga a qual foi projetada, se rompendo antes do ideal (MODENESI, 2001).

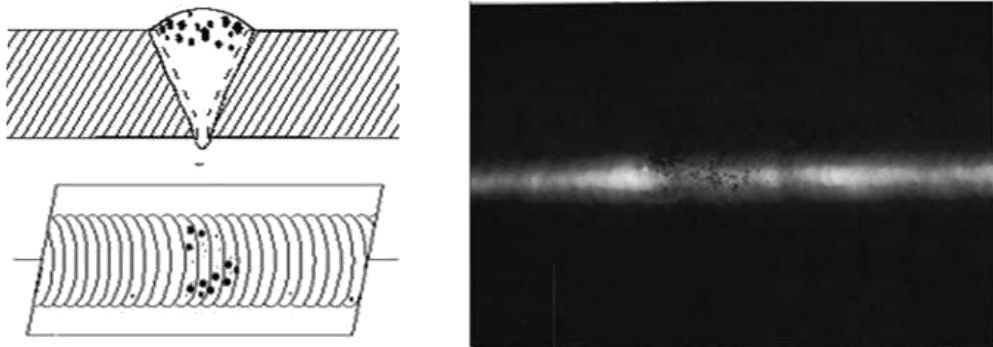
Segundo(MARQUES,2005), os principais defeitos de soldagem são: Porosidade, Inclusões, Falta de Fusão ,Falta de Penetração ,Concavidade e sobreposição Trincas Inter lamelar ,Trincas na garganta e Trincas na Raiz ,Trincas na Margem e trincas sob Cordão, Mordedura.

A porosidade é causada pelo emprego de técnicas incorretas (comprimento do arco ou alta velocidade de soldagem), pela utilização de metal base sem limpeza contendo oxidação tinta graxa, óleo, por eletrodo úmido., gás de proteção improprio ou seu fluxo muito alto, A porosidade agrupada ocorre, às vezes, na abertura e fechamento do arco.

Para que não haja este tipo de defeito é necessário que o material esteja limpo, no caso da utilização de eletrodos os mesmos devem ser guardados em estufas, a distância correta do eletrodo e velocidade de soldagem deve ser respeitada (KUMAR et al., 2023; HARRISON, 2024).

Na figura 41 podemos observar como a porosidade é identificada no cordão de solda e na imagem de raio x devido as porosidades.

Figura 40 - Porosidade

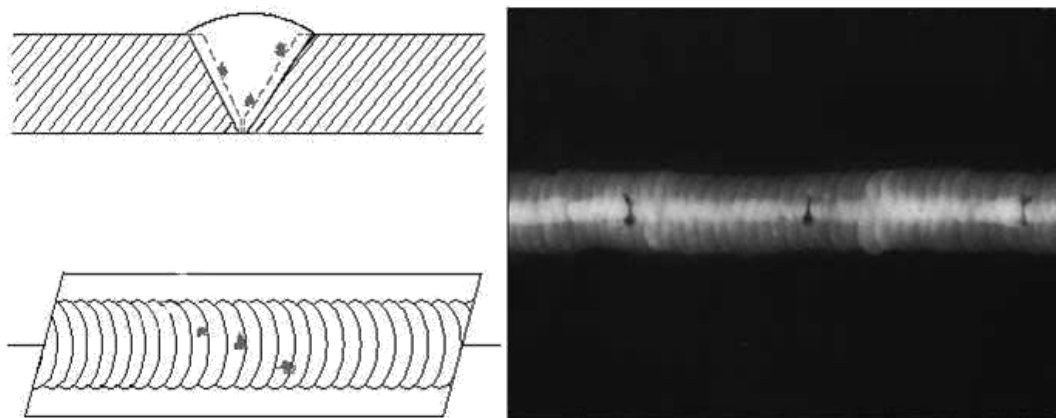


Fonte: Freitas - 2018

As inclusões são provocadas pela manipulação inadequada do eletrodo e pela limpeza deficiente entre os passes. É um problema previsível, no caso de projeto inadequado no que se refere ao acesso à Junta a ser soldada ou mesmo com pequenos ângulos de bisel, para evitar esse tipo de defeito é necessário a utilização das técnicas de soldagem correta além da limpeza entre os passes de solda e verificação se existe espaço para os passes de preenchimento. (HARRISON, 2024)

Na figura 42 podemos observar os defeitos no cordão de solda na imagem de raio x devido as inclusões

Figura 41 - Inclusões



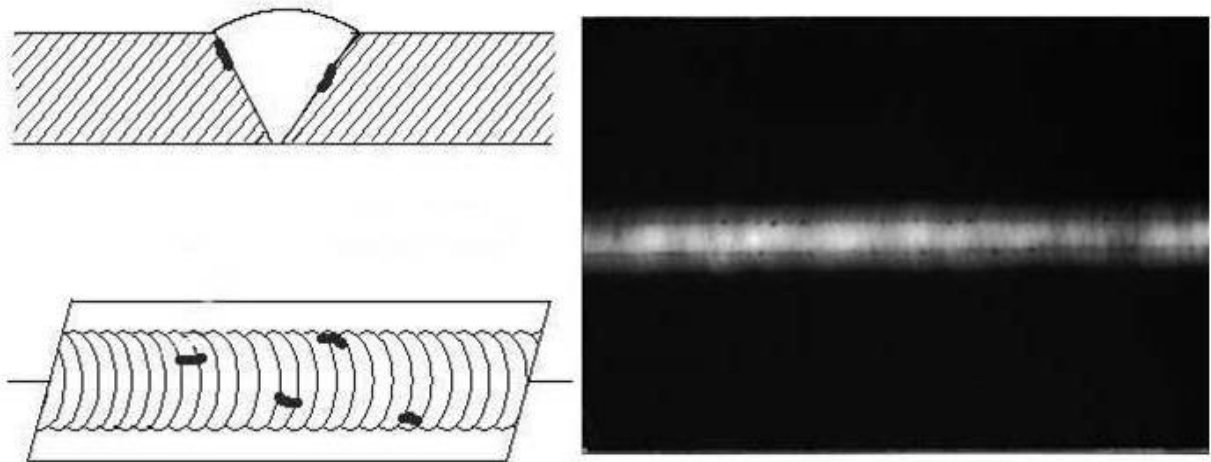
Fonte: Freitas - 2018

A falta de fusão e de penetração é resultado de uma técnica de soldagem inadequada com uma soldagem em alta velocidade, assim e espessura do cordão de solda resulta em uma espessura menor que a desejada, e a solda não preenche corretamente a lacuna do chanfro(BRASIL, [n.d.]; MARQUES, 2005),

Para evitar esse tipo de defeito é necessário a utilização das técnicas de soldagem correta, além de verificar se existe muito espaço entre os materiais a serem soldados, desalinhamento da junta , diâmetro do eletrodo inapropriado, velocidade de soldagem muito rápida onde não existe tempo suficiente para fusão do material(HARRISON, 2024).

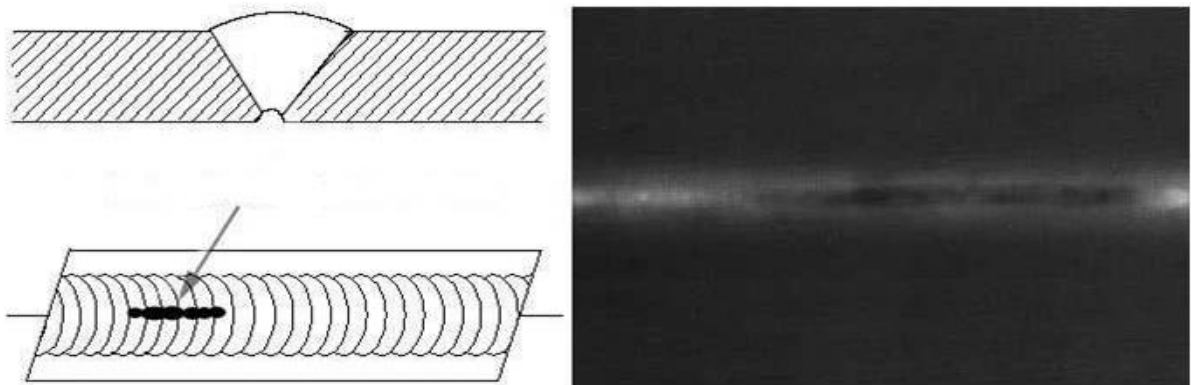
Abaixo na figura 43 temos a imagem do raio x da falta de Fusão e na figura 44 a falta de penetração que são defeitos semelhantes.

Figura 42 - Falta de Fusão



Fonte: Freitas - 2018

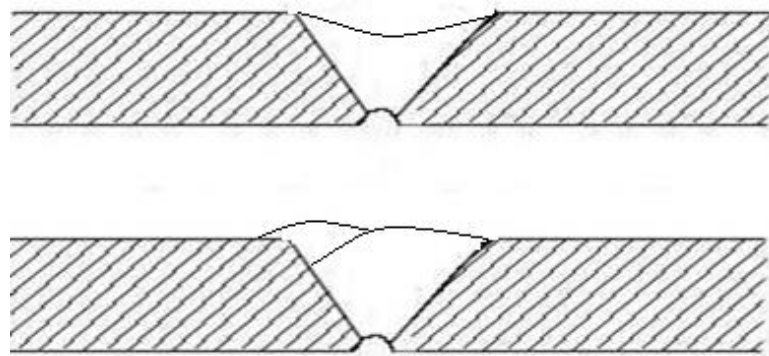
Figura 43 - Falta de Penetração



Fonte: Freitas (2018)

A sobreposição é um defeito de soldagem onde o material cobre a solda sem aderir este defeito surge pela não utilização das técnicas corretas de soldagem, e é um defeito que originado pela imperícia do operador, da mesma forma a concavidade também surge pela imperícia do operador gerando falta de material no chanfro da união, este defeito é resolvido utilizando as técnicas corretas de soldagem na figura 45 temos esse defeito por falta de habilidade do operador.

Figura 44 - concavidade e sobreposição

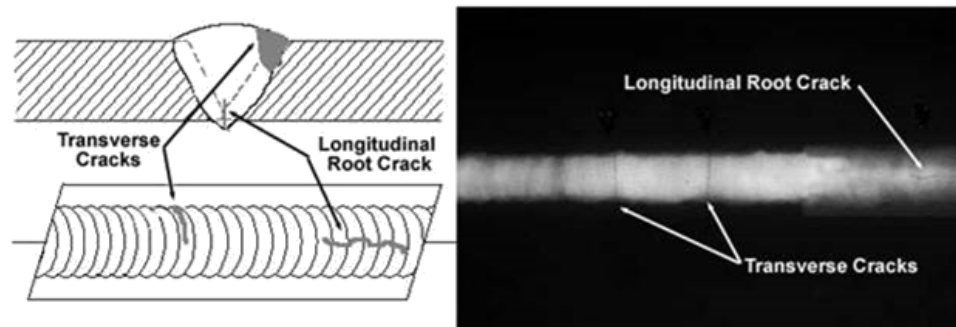


Fonte: Freitas (2018)

As trincas podem ocorrer a quente e a frio as trincas a quente são trincas de solidificação e ocorrem no centro da poça de fusão, as trincas a frio aparecem na superfície do metal ou onde o calor afetou a peça, após a solda ter sido executada, portanto, podem não ser detectadas por uma inspeção realizada imediatamente após a operação de soldagem. (Li et al., 2025; MARQUES, 2005).

As trincas são causadas pela tensão residual que fica na peça pelo calor gerado no processo, pela contaminação do metal de base, alto teor de enxofre e carbono no metal. O hidrogênio proveniente da umidade, falta de pré-aquecimento no metal base como podemos verificar na figura 46.

Figura 45 - Trincas

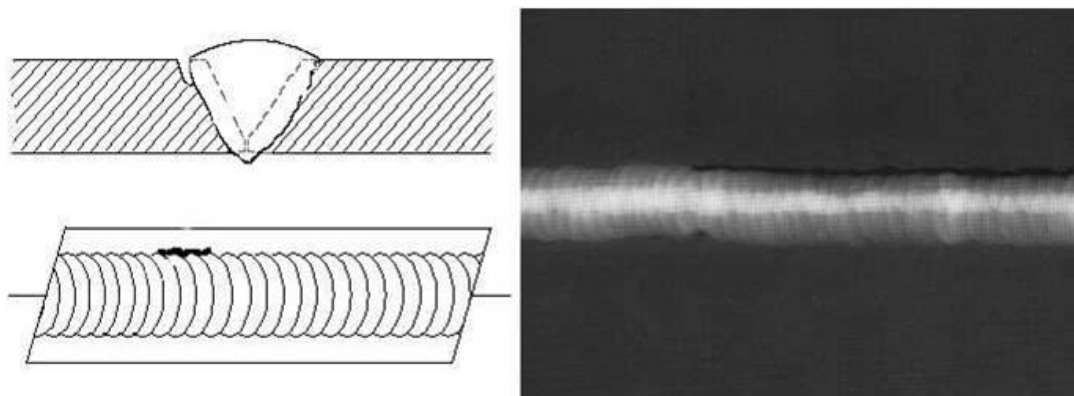


Fonte: Freitas (2018)

Podemos observar as mordeduras na figura 47, elas ocorrem quando o metal base se funde devido ao calor, mas não é preenchido adequadamente pelo material de solda, resultando em uma área mais frágil que pode levar a trincas.

Para evitar esse problema, é essencial ajustar corretamente a corrente e a voltagem de soldagem, além de posicionar a tocha no ângulo adequado durante o processo, ajustar a amperagem correta do equipamento pois amperagens elevadas contribuem a aparecimento de mordeduras (FAN et al., 2024).

Figura 46 - Mordeduras



Fonte: Freitas (2018)

### **3.5 Inspeção na junta soldada**

A inspeção de solda no Brasil tem uma trajetória marcada pela evolução das normas técnicas e pela crescente demanda por qualidade e segurança nas estruturas metálicas. A Associação Brasileira de Normas Técnicas (ABNT) desempenha um papel fundamental nesse processo, estabelecendo critérios para a qualificação e certificação de inspetores de soldagem.

A inspeção de solda é o processo que assegura que a união da junta soldada vai resistir conforme sua especificação, a inspeção garante que não existe defeitos que possam comprometer a estrutura da junta soldada, e esta inspeção não só garante a durabilidade do produto mas também garante a integridade dos usuários e a operação do produto final como um navio por exemplo. (“A wall climbing robot based on machine vision for automatic welding seam inspection,” 2024).

A inspeção de solda tradicionalmente depende profundamente do inspetor de solda e de equipamentos manuais como de equipamentos de alto nível como ultrassom e raio x, nem sempre é simples e fácil de um inspetor realizar uma inspeção de solda pois tudo isso vai depender do cenário onde está a solda.

Tanto na indústria naval, óleo gás, aeroespacial a inspeção da junta soldada está condicionada a ambiente insalubres e perigosos os quais afetam o discernimento do operador, dificultam e encarecem o processo de inspeção (“A wall climbing robot based on machine vision for automatic welding seam inspection,” 2024).

### **3.6 Métodos de Inspeção na junta soldada**

Entre os métodos inspeções de soldagem temos os ensaios destrutivos e não destrutivos, a solda pode ser avaliada tanto em relação as dimensões e geometrias da solda quanto as discontinuidades do processo de solda, garantindo que a solda atenda aos requisitos de desempenho e segurança a qual foi projetada (MARQUES, 2005).

A inspeção visual é a primeira inspeção realizada na junta soldada essa inspeção pode ser realizada a olho nú ou com o auxílio de lentes e câmeras que podem aprimorar a imagem, na inspeção visual podemos verificar desalinhamento, uniformidade da solda trincas inclusões escórias e defeitos superficiais que podem comprometer o funcionamento da junta soldada (Zuo et al., 2025).

A inspeção visual é econômica, pois não requer equipamentos e consumíveis de alto custo, embora a inspeção visual pareça algo bem simples comparada aos outros processos ela é de vital importância para o processo pois consegue identificar defeitos antes de ter que ser realizados processos mais custosos e demorados. Além de ser rápida e eficiente, pois o operador pode verificar se tem algo em desacordo com a solda.(REIS, 2019a).Na figura 48 temos um inspetor realizando uma inspeção visual com uma lanterna

Figura 47 - Inspeção visual



Fonte: Inspesolda -2025

Segundo as normas ASTM E165 e ISO 3452-1, ensaio do líquido penetrante é um ensaio não destrutivo, é realizado através de um líquido colocado na superfície da peça onde por capilaridade ele vai para as áreas defeituosas e é revelado através do revelador e de luzes uv.

Este ensaio é um ensaio de baixo custo e de certa simplicidade de execução, surgiu em 1940, é utilizado para verificar discontinuidades superficiais que sejam abertas na superfície pois o líquido penetrante precisa entrar na discontinuidade para ser revelado, a superfície do material não pode ser porosa, ou rugosa pois estas superfícies não pode ser retirada todo o penetrante e isso causa mascaramento do resultado, podemos verificar as etapas de aplicação na tabela 3 (REIS, 2019b).

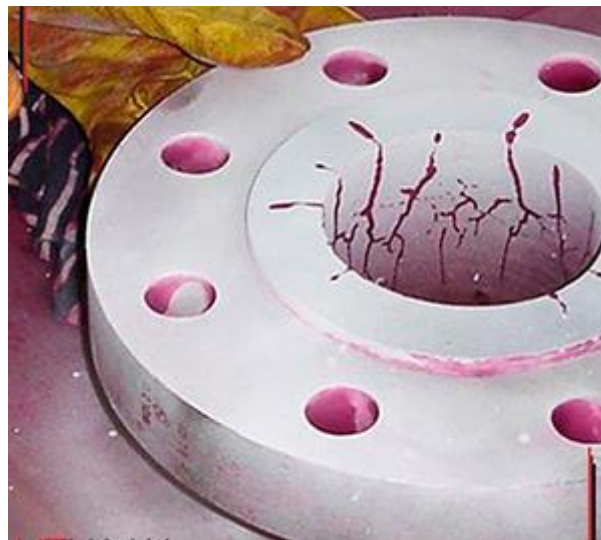
Tabela 3 - Passos ensaio líquido penetrante

| Etapa                    | Descrição                                                            |
|--------------------------|----------------------------------------------------------------------|
| Preparação da Superfície | Limpeza completa para garantir que o penetrante alcance os defeitos. |
| Aplicação do Penetrante  | Uso de líquido de alta viscosidade para infiltrar em fissuras.       |
| Tempo de Penetração      | Período necessário para o líquido penetrar completamente.            |
| Remoção do Excesso       | Limpeza da superfície com removedores adequados.                     |
| Aplicação do Revelador   | Contraste visual para facilitar a identificação das falhas.          |
| Inspeção e Avaliação     | Detecção de defeitos com o uso de iluminação específica.             |

Fonte: Inspesolda – 2025

Na figura 49 temos a imagem após ser realizada o ensaio do liquido penetrante.

Figura 48 - Inspeção líquido penetrante



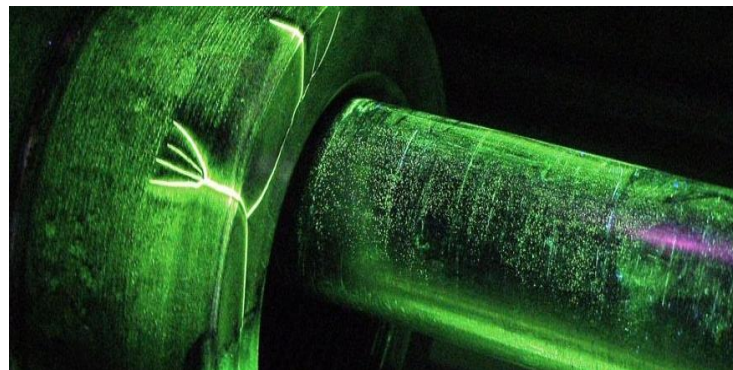
Fonte: Utmax - 2025

O ensaio de partículas magnéticas é um ensaio não destrutivo que utiliza partículas magnéticas para detectar as discontinuidades superficiais e subsuperficiais em materiais ferromagnéticos. ou seja, o ensaio consiste em verificar se existe uma discontinuidade no fluxo do campo magnético do material pois quando ele não possui defeito o fluxo magnético não possui discontinuidade.

O processo de ensaio magnetiza toda a superfície da peça por meio de um campo elétrico induzido. Caso haja alguma descontinuidade, ela causará o desvio do campo para fora da peça, gerando um dipolo magnético com polos nortes e sul. Quando partículas magnéticas são aplicadas na superfície, elas são atraídas pelo dipolo, para garantir a detecção de descontinuidades, é essencial que estas estejam posicionadas de forma a cruzar ou interceptar as linhas do fluxo magnético induzido. Dessa forma, a peça precisa ser magnetizada em pelo menos duas direções perpendiculares entre si.

As partículas magnéticas são a base de pó de ferro ou óxido de ferro, com características de visibilidade e fluorescência. Disponível em forma de pó seco ou diluído em soluções específicas, é utilizado para identificar descontinuidades superficiais ou subsuperficiais em materiais ferromagnéticos, sendo desenvolvido especialmente para aplicação na Inspeção por Partículas Magnética como verificamos na figura 50.

Figura 49 - Inspeção partículas magnéticas



Fonte: Tecnege - 2019

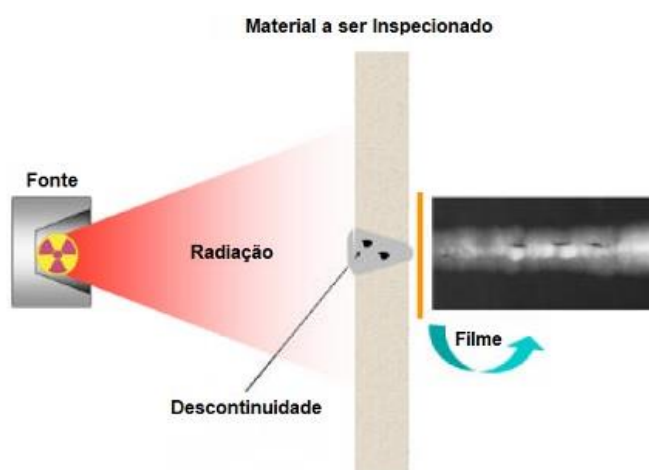
A inspeção de soldas por raio x também é um ensaio não destrutivo, essa inspeção é semelhante a radiografia médica., essa inspeção permite a identificação de falhas internas que podem comprometer a integridade estrutural da junta soldada. Este método, utiliza raios X ou raios gama para criar imagens da estrutura interna das soldas.(X. WANG et al., 2025).

O processo começa com a emissão de radiação que, ao atravessar a solda, é parcialmente absorvida dependendo da densidade e espessura do material. As descontinuidades, como poros, rachaduras ou inclusões, afetam essa absorção,

resultando em variações na exposição do filme radiográfico. Essas variações se manifestam em diferentes tonalidades na imagem revelada, onde áreas mais escuras indicam menos absorção (ou seja, descontinuidades) e áreas mais claras, maior absorção.(WANG et al., 2025b).

Os parâmetros a considerar incluem a energia dos raios, o tempo de exposição, a distância entre a fonte de radiação e o filme, além das características do material a ser inspecionado. Esse método é utilizado em diversas indústrias, como a construção naval, indústria petroquímica, metalúrgicas, na imagem da figura 51 tem o esquema da inspeção radiográfica.(ZHANG et al., 2024).

Figura 50 - Esquema inspeção radiográfica



Fonte: Infosolda - 2017

A inspeção por ultrassom utiliza-se do princípio de reflexão de ondas acústicas, quando encontram um obstáculo, a onda será refletida e voltará a sua fonte. Essa inspeção é uma técnica de ensaio não destrutivo que desempenha de grande importância a garantia da junta soldada. Essa metodologia utiliza ondas ultrassônicas para identificar descontinuidades internas em equipamentos, peças, tubos e chapas, sendo amplamente aplicada em diversas indústrias.

O processo de inspeção é capaz de detectar anomalias durante a fabricação, como trincas, falta de fusão e falta de penetração, desde que realizado de maneira adequada. Além disso, a técnica permite avaliar o estado de deterioração ou corrosão de uma peça, fornecendo informações relevantes que ajudam a evitar prejuízos ou falhas no equipamento. Dessa forma, a inspeção de solda por ultrassom contribui para

um desempenho mais consistente e de qualidade, assegurando a confiabilidade dos produtos fabricado.

## 4 MATERIAIS E MÉTODOS

A presente seção descreve os materiais, ferramentas e procedimentos empregados no desenvolvimento da metodologia proposta para a inspeção de soldas por meio de redes neurais convolucionais (CNN). O detalhamento visa assegurar a reprodutibilidade do experimento.

Inicialmente, são apresentados os equipamentos e recursos utilizados para a aquisição das imagens de solda, contemplando o tipo de soldagem analisada e as características dos dispositivos empregados. Em seguida, descreve-se o processo de pré-processamento das imagens, incluindo técnicas de normalização, segmentação e aumento de dados (data augmentation), aplicadas com o intuito de garantir maior robustez ao modelo.

Na sequência, são detalhados os aspectos da arquitetura da rede neural convolucional adotada, bem como os parâmetros de treinamento, funções de ativação, critérios de otimização e métricas de avaliação de desempenho. Por fim, são expostos os métodos utilizados para validação e testes, assegurando a análise crítica dos resultados obtidos e sua comparação com métodos tradicionais de inspeção de solda.

Assim, esta seção estrutura-se de modo a apresentar, de forma clara e sistemática, todos os materiais e métodos que sustentam a aplicação da inteligência artificial no contexto da inspeção de qualidade de juntas soldadas e a forma que foi construída o aplicativo para inspeção de soldagem.

### 4.1 Hardware: Materiais e equipamentos

Nesta seção são descritos os materiais e equipamentos utilizados para a realização dos experimentos e obtenção dos corpos de prova destinados à inspeção por meio de redes neurais convolucionais. A caracterização detalhada dos recursos empregados é essencial para garantir a rastreabilidade do processo experimental, possibilitando a reprodução dos resultados em condições semelhantes.

Foram considerados, inicialmente, os equipamentos de soldagem utilizados na preparação das amostras, especificando-se a máquina de solda, seus parâmetros operacionais e as condições de trabalho adotadas. Em seguida, apresentam-se os

materiais empregados na confecção dos corpos de solda, incluindo o tipo de metal base, o metal de adição e os consumíveis aplicados durante o processo.

A definição desses materiais e equipamentos fundamenta-se na necessidade de representar condições reais de soldagem, assegurando que os corpos de prova reflitam situações práticas encontradas na indústria. Dessa forma, a descrição aqui apresentada constitui a base experimental para a etapa subsequente de aquisição de imagens e análise automatizada por redes neurais convolucionais.

#### 4.1.1 Equipamento soldagem Tig Syncrowave 250 DX Runner

Especificações técnicas:

Amperagem: 3 - 310 A; Tensão: 200/230/460 VAC.

Ciclo de trabalho: 250 A à 30 VCA, 40% de ciclo de trabalho; 200 A a 28 VCA, 60% de ciclo de trabalho.

Potência de entrada: energia monofásica.

Peso: 172 kg; Dimensões: 845 mm (A) x 572 mm (L) x 635 mm (P).

Processos de soldagem: TIG (GTAW), Pulsado TIG (GTAW-P) e Stick (SMAW).

Tensão máxima em circuito aberto: 80 V.

Visor digital: Exibe a corrente e a tensão de soldagem, tanto os valores ajustados quanto os reais, para maior precisão.

Na figura 52 temos a foto do equipamento.

Figura 51 - Equipamento soldagem Tig Syncrowave 250 DX Runner



Fonte: Próprio Autor (2025)

#### 4.1.2 Tocha TIG

A Tocha Tig Refrigerada 18/350 Barbosa tem 3,5 metros de comprimento e adaptador de 12,8mm, esta tocha é projetada para proporcionar desempenho em aplicações tanto em corrente contínua (DC) quanto alternada (AC). Ideal para soldagens industriais, possui corpo flexível que facilita o manuseio e garante maior conforto durante o uso prolongado. Com capacidade para 300A em corrente DC e 240A em corrente AC na figura 53 temos a imagem da tocha.

Figura 52 - Tocha Tig



Fonte: Próprio Autor (2025)

#### 4.1.3 Mistura Gasosa para Soldagem TIG

Nos ensaios realizados nesta pesquisa, foi utilizada a soldagem TIG no aço inoxidável **AISI 306**, com proteção gasosa de **argônio puro (100% Ar)**. O argônio é o gás inerte mais utilizado neste processo devido à sua capacidade de estabilizar o arco elétrico, à sua baixa condutividade térmica e à sua elevada densidade, que proporciona uma cobertura eficaz da poça de fusão, na figura 54 temos a imagem do cilindro de gás utilizado.

Figura 53 - Gás argônio utilizado



Fonte: Próprio Autor (2025)

#### 4.1.4 Medição da vazão do gás

A vazão do gás foi ajustada entre 10 litros por minuto (L/min), de acordo com as recomendações do fabricante do equipamento e boas práticas de soldagem para juntas em aço inoxidável. A escolha do argônio puro também contribuiu para evitar a formação de óxidos na zona afetada pelo calor, assegurando um cordão de solda com excelente acabamento superficial e mínima ocorrência de defeitos, como porosidades ou inclusões a medição do gás foi utilizado o fluxômetro conforme figura 55.

Figura 54 - Fluxômetro



Fonte: Próprio Autor (2025)

#### 4.1.5 Composição química do aço inox

Material utilizado na soldagem foi barra chata de aço inox 3/16 aço inox 306 conforme composição química da tabela 4.

Tabela 4 - Composição química do aço inox

### 304

#### Composição química

| Aperam | C    | Mn  | Si   | P     | S     | Cr          | Ni         |
|--------|------|-----|------|-------|-------|-------------|------------|
| 304    | 0,08 | 2,0 | 0,75 | 0,040 | 0,030 | 18,0 a 20,0 | 8,0 a 11,0 |

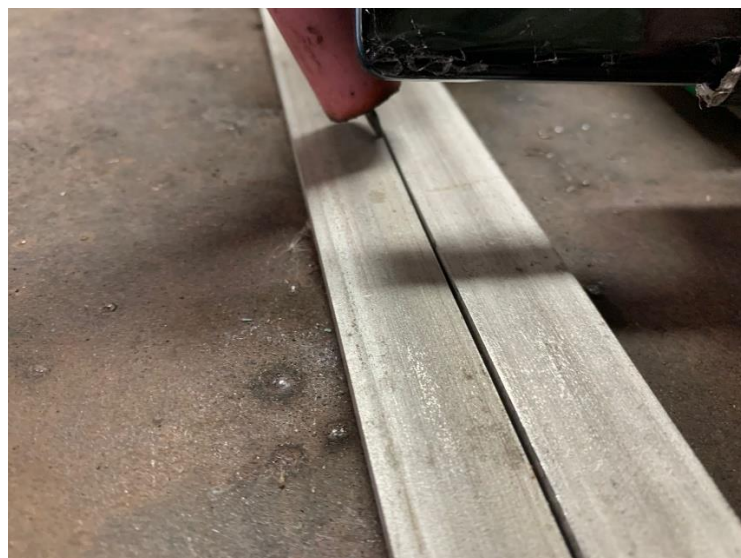
#### Propriedades mecânicas

| Aço   | Valores    | Limite de escoamento (MPa) | Limite de resistência (MPa) | Alongamento (%) | Dureza máxima (HRB) |
|-------|------------|----------------------------|-----------------------------|-----------------|---------------------|
| K03   | Norma ASTM | 205                        | 515                         | 35              | 90                  |
| (304) | Típicos    | 340                        | 700                         | 62              | 90                  |

Fonte: Próprio Autor - 2025

Na figura 56 temos o material e o esquema para soldagem dos cordões de solda.

Figura 55 - Barra chata inox



Fonte: Próprio Autor (2025)

#### 4.1.6 Telefone móvel utilizado

O Samsung Galaxy M31 possui tela do tipo Super AMOLED com dimensão de 6,4 polegadas e resolução de 2340 × 1080 pixels (Full HD+). Tal configuração proporciona densidade aproximada de 403 ppi, garantindo elevada nitidez e fidelidade na reprodução de cores.

A configuração de câmeras do dispositivo compreende quatro sensores traseiros: principal de 64 megapixels (resolução máxima de imagem de 9000 × 7000 pixels), ultra-angular de 8 megapixels, macro de 5 megapixels e sensor de profundidade com 5 megapixels. A câmera frontal possui 32 megapixels, sendo ambas capazes de gravar vídeos em qualidade 4K (3840 × 2160 pixels) a 30 quadros por segundo.

O equipamento é alimentado por um processador Exynos 9611 de oito núcleos, operando até 2,3 GHz. Conta com memória RAM de 6 GB e armazenamento interno de 128 GB (tecnologia UFS 2.1), expansível via cartão microSD até 512 GB.

Com capacidade de 6000 mAh (íons de lítio, não removível), o aparelho demonstra excelente desempenho energético, podendo alcançar até 48 horas de autonomia com uso moderado.

O dispositivo apresenta compatibilidade com redes LTE 4G, Wi-Fi padrão 802.11 a/b/g/n/ac, Bluetooth 5.0 e sistema de posicionamento global (GPS, A-GPS, GLONASS e BDS). Inclui entrada USB-C, conector de áudio P2 (3,5 mm), rádio FM e leitor de impressão digital na parte posterior. O sistema operacional embarcado é o Android 11, executado sob a interface Samsung One UI Core 3.0.

O corpo do aparelho apresenta espessura de 8,9 milímetros, contribuindo para uma boa ergonomia e aspecto estético refinado conforme a figura 57.

Figura 56 - Celular utilizado



Fonte: Próprio Autor (2025)

Na figura 58 temos os parâmetros do celular

Figura 57 - Parâmetros do celular

|                |               |         |                                                                               |
|----------------|---------------|---------|-------------------------------------------------------------------------------|
| Display        |               |         | 6.4" FHD+ (1080 x2340)<br>Super AMOLED                                        |
| Câmera         | Traseira      |         | 64 MP (Principal)<br>8 MP (Ultra Wide)<br>5 MP (Macro)<br>5 MP (Profundidade) |
|                | Frontal       |         | 32 MP                                                                         |
| Processador    |               |         | Octa-Core 2.3 GHz<br><u>Exynos</u> 9611                                       |
| Memória        | RAM           |         | 6 GB                                                                          |
|                | Armazenamento | Interno | 128 GB                                                                        |
|                |               | MicroSD | 1 TB                                                                          |
| Bateria        |               |         | 6,000 mAh (15W carregamento rápido)                                           |
| Dimensões/Peso |               |         | 159.2 x 75.1 x 8.9 mm, 191 g                                                  |
| Outros         |               |         | Sensor de impressão digital na parte traseira<br>Reconhecimento facial        |

Fonte – ABC da comunicação - 2020

## 4.2 Software

Além dos recursos físicos empregados na preparação dos corpos de prova, esta pesquisa contou com o uso de softwares e ferramentas computacionais que

desempenharam papel fundamental nas etapas de processamento, treinamento e aplicação prática da rede neural convolucional.

O Google Colab foi utilizado como ambiente de desenvolvimento e execução dos códigos em Python, possibilitando a implementação dos algoritmos de aprendizado de máquina, o treinamento do modelo e a validação dos resultados. Sua infraestrutura baseada em nuvem permitiu acesso a recursos computacionais avançados, como GPU, otimizando o desempenho do treinamento.

Para a etapa de aplicação prática, foi desenvolvido um aplicativo em HTML, visando a integração da rede neural em dispositivos móveis. Esse aplicativo possibilita a identificação automática de soldas diretamente no celular, aproximando a pesquisa de um cenário real de uso industrial.

A adoção desses softwares foi essencial para unir a parte experimental da soldagem com a aplicação computacional, garantindo a viabilidade técnica e a reprodutibilidade do estudo.

#### 4.2.1 Treinamento na rede neural convolucional

O Google Colab (Collaboratory) é uma ferramenta baseada em nuvem que oferece um ambiente de notebooks Jupyter com suporte à execução de código Python, amplamente utilizada para experimentos com aprendizado de máquina e análise de dados. Uma de suas principais vantagens é a possibilidade de utilizar recursos computacionais como GPUs e TPUs gratuitamente. Para que modelos de aprendizado de máquina possam ser treinados e avaliados, é essencial o uso de conjuntos de dados (datasets), que podem ser integrados ao Colab de diversas maneiras.

Os datasets podem ser utilizados no Google Colab por meio de diferentes fontes:

Upload Manual: O usuário pode fazer upload de arquivos diretamente do seu computador para o ambiente temporário do Colab. Isso é feito por meio da função `files.upload()` da biblioteca `google.colab`. Embora prático, esse método não é ideal para datasets grandes, pois os arquivos são apagados assim que a sessão é encerrada.

Google Drive: Para armazenar datasets de forma persistente e acessá-los diretamente no Colab, é comum a utilização do Google Drive. O Drive pode ser montado no Colab utilizando a função `drive.mount()` da biblioteca `google.colab`. Esse método permite ler e escrever arquivos, facilitando o uso de conjuntos de dados de médio a grande porte de forma contínua e organizada esta opção foi a utilizada no trabalho devido a grande quantidade de imagens.

Fontes Externas (URLs): Também é possível importar datasets hospedados em servidores externos, como repositórios GitHub ou sites públicos, utilizando bibliotecas como `requests`, `wget` ou `curl`. Este método é especialmente útil para acessar datasets públicos e padronizados como MNIST, CIFAR-10, COCO, entre outros.

Após a importação, os datasets geralmente precisam ser organizados e pré-processados antes de serem utilizados nos modelos. Isso pode incluir:

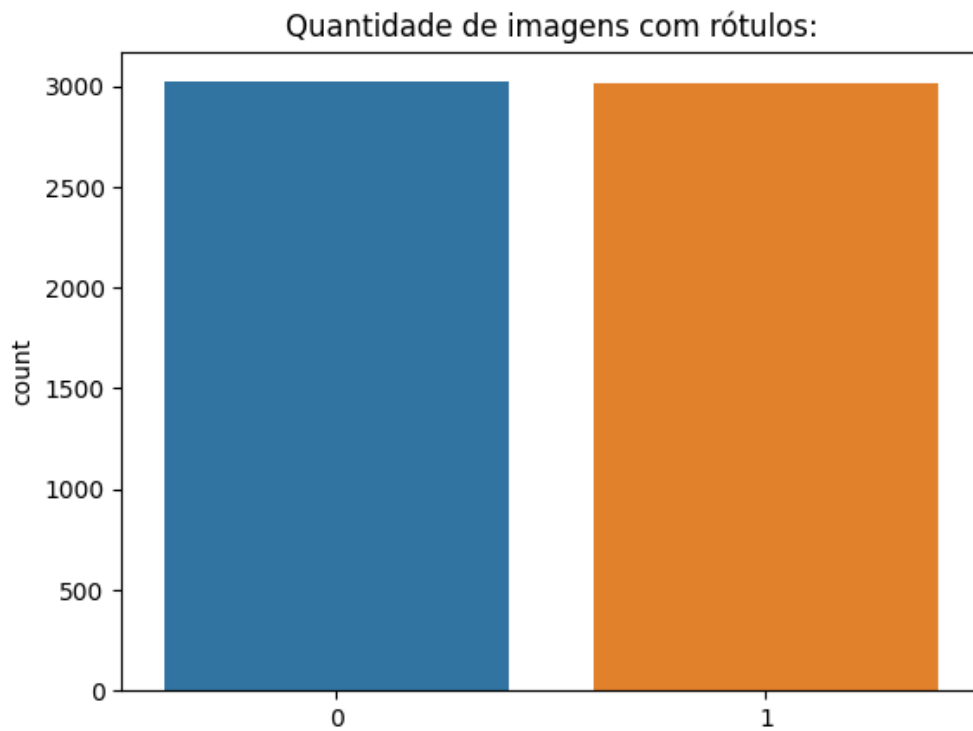
- Normalização ou padronização dos dados;
- Conversão para formatos compatíveis com bibliotecas como TensorFlow ou PyTorch (por exemplo, arrays NumPy ou tensores);
- Divisão em conjuntos de treinamento, validação e teste;
- Codificação de variáveis categóricas (one-hot encoding);
- Tratamento de valores ausentes.

Essas etapas são fundamentais para garantir que o modelo aprenda corretamente a partir dos dados fornecidos.

Para iniciarmos o trabalho utilizamos um banco de dados cedido pela plataforma kaggle com 5 mil o processo de soldagem foi o processo Tig realizado com uma ponta de tungstênio e teve as amperagens de 175,200,250 e 300amperes, o gas de proteção utilizado foi o argônio. O metal base foi o aço inox 304 na espessura de 1/4mm.

As imagens foram classificadas no software como boas e ruins, dando os devidos rótulos a elas, conforme a imagem 59 dos rótulos do banco de dados.

Figura 58 - Rótulos



Fonte: Próprio Autor (2025)

Logo abaixo temos o exemplo de uma solda boa e uma ruim, nas imagens 60 e 61 respectivamente. Devido a classificação que foi aferida no banco de dados, para que a rede neural faça seu reconhecimento essa é a aferição de um operador classificando a solda em boa e em ruim.

Figura 59 - Solda boa



Fonte: Próprio Autor (2025)

Figura 60 - Solda ruim



Fonte: Próprio Autor (2025)

Já no ambiente do Keras, se tratando de um modelo de classificação de classes, podemos alterar alguns valores iniciais para customização dos parâmetros, para se adequar a tarefa desejada. Neste caso não fizemos mudanças nos valores pré-estabelecidos pela biblioteca do keras.como mostrado na figura 52.

Figura 61 - Início da CNN

#### ✓ INÍCIO CNN

```

from keras import layers
from keras import models
from keras import optimizers
from keras.preprocessing.image import ImageDataGenerator

model = models.Sequential()

model.add(layers.Conv2D(32, (3, 3), activation='relu', input_shape=(nrows, ncolumns, 3)))
model.add(layers.MaxPooling2D((2, 2)))

model.add(layers.Conv2D(64, (3, 3), activation='relu'))
model.add(layers.MaxPooling2D((2, 2)))

model.add(layers.Conv2D(128, (3, 3), activation='relu'))
model.add(layers.MaxPooling2D((2, 2)))

model.add(layers.Conv2D(128, (3, 3), activation='relu'))
model.add(layers.MaxPooling2D((2, 2)))

model.add(layers.Flatten())
model.add(layers.Dropout(0.5)) #Dropout for regularization
model.add(layers.Dense(512, activation='relu'))
model.add(layers.Dense(1, activation='sigmoid')) #Sigmoid function at the end because we

#Lets see our model
model.summary()

```

Fonte: Próprio Autor (2025)

#### 4.2.2 Descrição da criação do dataset

O dataset é composto por imagens de cordões de solda em diferentes condições de processo, contemplando tanto soldas com defeitos quanto soldas classificadas como “boas”. O objetivo principal do conjunto de dados é fornecer uma base para o treinamento e validação de modelos de visão computacional e redes neurais convulsionais aplicadas à inspeção de soldagem. Na figura 63 temos a sistemática da estrutura do Data Set.

Figura 62 - Estrutura Data-Set



Fonte: Próprio Autor (2025)

#### 4.2.3 Classificação das imagens do Dataset

O banco de dados foi organizado em cinco classes principais, representando condições distintas de qualidade da solda:

**Falta de Fusão** Defeito caracterizado pela ausência de união adequada entre o metal de adição e o metal base, ou entre passes sucessivos da solda.

Imagens apresentam descontinuidades visíveis, geralmente em regiões onde a poça de fusão não se formou corretamente.

**Porosidade (Poros)** Presença de cavidades esféricas formadas por aprisionamento de gases durante a solidificação do metal.

Nas imagens, aparecem como pontos ou agrupamentos de pequenas imperfeições.

Trincas Rupturas que podem se apresentar na superfície ou internamente ao cordão de solda, resultantes de tensões térmicas ou mecânicas.

Visualmente, as imagens exibem linhas irregulares, geralmente de tonalidade escura, indicando falha estrutural.

Bolhas de Solda Defeito associado à projeção de pequenas partículas metálicas durante o processo, que se solidificam fora do cordão.

Nas imagens, aparecem como pequenas esferas ou bolhas metálicas dispersas próximas ao cordão principal.

Solda boa “(Aceitável)” Cordões de solda considerados satisfatórios, sem a presença visível de defeitos críticos. As imagens apresentam superfície uniforme, sem irregularidades evidentes, sendo utilizadas como referência positiva.

Na figura 64 temos a classificação conforme a gama dos defeitos.

Figura 63 Classificação do dataset



Fonte: Próprio Autor (2025)

#### 4.2.4 Descrição do Código: Construção de uma Rede Neural Convolucional com Keras

O código apresentado mostra a construção de um modelo de rede neural convolucional (CNN), uma arquitetura amplamente utilizada em tarefas de classificação de imagens. A implementação é realizada por meio da biblioteca Keras, com backend TensorFlow, o que facilita a criação de modelos de deep learning.

. Importação das bibliotecas

```
python
CopiarEditar
from keras import layers, models, optimizers
from keras.preprocessing.image import ImageDataGenerator
```

Essas bibliotecas são essenciais para:

- Definir camadas da rede (layers),
- Criar o modelo sequencial (models),
- Utilizar otimizadores para o treinamento,
- Realizar o pré-processamento de imagens (ImageDataGenerator).

```
python
CopiarEditar
model = models.Sequential()
```

O modelo do tipo `Sequential` é linear e empilha as camadas uma após a outra. Essa é uma estrutura comum para modelos de CNN em tarefas de classificação simples.

##### Camadas Convolucionais e de Pooling

O modelo é composto por **quatro blocos convolucionais**, cada um seguido por uma camada de **MaxPooling2D**. As camadas convolucionais aplicam filtros que detectam padrões locais nas imagens, como bordas e texturas.

```
python
CopiarEditar
model.add(layers.Conv2D(32, (3, 3), activation='relu',
input_shape=(nrows, ncolumns, 3)))
model.add(layers.MaxPooling2D((2, 2)))
```

- **Conv2D**: Aplica 32 filtros de tamanho 3x3 com ativação ReLU.
- **input\_shape**: Define o tamanho das imagens de entrada (altura `nrows`, largura `ncolumns`, e 3 canais de cor RGB).
- **MaxPooling2D**: Reduz a dimensionalidade espacial pela metade, diminuindo o custo computacional e mantendo as informações mais relevantes.

Esse padrão é repetido com 64 e depois 128 filtros, aumentando a capacidade da rede de identificar padrões mais complexos à medida que se avança nas camadas.

#### 4.2.4.1 Camadas Densas (Fully Connected)

Após a extração de características com convoluções, a saída é **achatada (flatten)** e passada para camadas densas.

```
python
CopiarEditar
model.add(layers.Flatten())
model.add(layers.Dropout(0.5)) # Regularização
model.add(layers.Dense(512, activation='relu'))
model.add(layers.Dense(1, activation='sigmoid'))
```

- Flatten: Transforma a saída 2D em vetor 1D.
- Dropout(0.5): Técnica de regularização que desativa aleatoriamente 50% dos neurônios durante o treinamento, prevenindo overfitting.
- Dense(512): Camada totalmente conectada com 512 neurônios e função ReLU.
- Dense(1, activation='sigmoid'): Camada de saída com 1 neurônio e função sigmoid, utilizada para classificação binária (ex: presença ou ausência de um defeito em imagens industriais).

#### 4.2.4.2 . Visualização do Modelo

```
python
CopiarEditar
model.summary()
```

Exibe um resumo do modelo com a quantidade de parâmetros treináveis e a estrutura sequencial das camadas.

### 4.3 Método

O presente trabalho caracteriza-se como uma pesquisa experimental e aplicada, voltada ao desenvolvimento e avaliação de uma metodologia de inspeção de soldas por meio de técnicas de visão computacional e aprendizado profundo. Inicialmente, foram produzidos corpos de prova através de processo de soldagem, empregando-se máquina de solda e materiais previamente especificados. A etapa de aquisição de imagens foi realizada de forma instrumental direta, por meio da aquisição de imagens pelo smartphone (Samsung Galaxy M31).

As imagens obtidas integraram a base de dados para as etapas computacionais juntamente com as imagens que foram adquiridas de um banco de dados da internet.

Assim realizou-se o pré-processamento, aumento de dados e aplicação de uma rede neural convolucional (CNN) para análise e classificação.

O treinamento e validação do modelo foram realizados em ambiente de computação em nuvem (Google Colab), com a utilização da linguagem de programação Python, utilizando bibliotecas específicas de aprendizado de máquina. Por fim, para aplicação prática, desenvolveu-se um protótipo de aplicativo em HTML, possibilitando a identificação automática de soldas em dispositivos móveis.

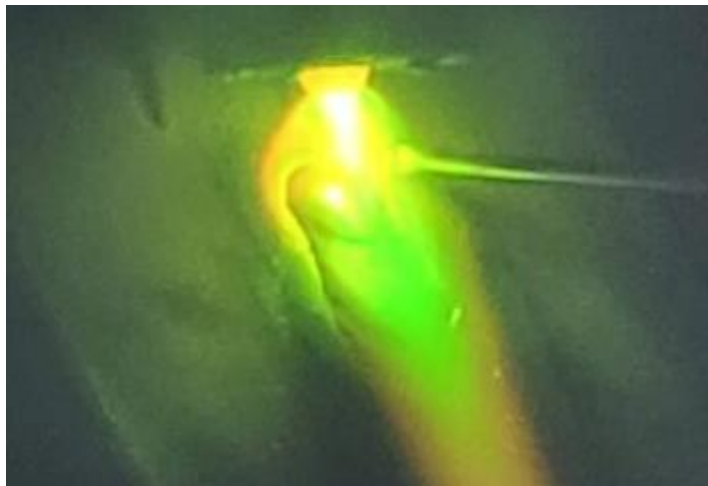
#### 4.3.1 Testes

Após o treinamento da rede neural com o dataset da plataforma kaggle

Para aquisição das imagens fotografamos a solda através de uma câmera de celular (Samsung galaxy m31).

Fizemos dois tipos de solda, boa e ruim conforme as figuras 65 e 66.

Figura 64 - Solda boa simulada



Fonte: Próprio Autor (2025)

Figura 65 - Solda ruim simulada



Fonte: Próprio Autor (2025)

Na solda boa temos os seguintes parâmetros conforme a tabela 5.

Tabela 5 - Parâmetros de solda "boa"

| Parâmetro                        | valor     |
|----------------------------------|-----------|
| Amperagem                        | 180 amper |
| Voltagem                         | 17 volts  |
| Velocidade média de deslocamento | 16 cm min |
| Fluxo de gás                     | 12l/min   |
| Tungstênio                       | lantanio  |
| Arame de adição                  | Er70s3    |

Fonte: Próprio Autor (2025)

Na solda ruim diminuimos a amperagem e aumentamos a velocidade de soldagem para que assim a solda ficasse sem penetração conforme os dados da tabela6.

Tabela 6 - Parâmetro solda "ruim"

| Parâmetro                        | valor     |
|----------------------------------|-----------|
| Amperagem                        | 80 amper  |
| Voltagem                         | 10 volts  |
| Velocidade média de deslocamento | 10 cm min |
| Fluxo de gás                     | 10l/min   |
| Tungstênio                       | 3         |
| Arame de adição                  | 2         |

Fonte: Próprio Autor (2025)

#### 4.3.2 Criação do aplicativo para smartphone

Utilizou-se da linguagem HTML, CSS e Java Script, com o objetivo de que o aplicativo pudesse ser acessado diretamente no celular. A ideia inicial foi desenvolver uma ferramenta simples que permitisse carregar imagens de solda e a partir delas, realizar a comparação visual entre soldas boas e ruins com o banco de dados que foi criado e testado anteriormente.

O primeiro passo foi iniciar com a interface em HTML conforma demonstrado o início do código na figura 67, organizando as telas principais: a página inicial, a área de upload de imagens e a tela de resultado. Em seguida, utilizei CSS para deixar o design responsivo, adaptando o layout para telas de celulares, com botões maiores e navegação fácil.

Figura 66 - Código HTML

```

30 body {
31   background: linear-gradient(135deg, #0d1b28, #1a2b3c);
32   color: #fff;
33   line-height: 1.6;
34   min-height: 100vh;
35   padding: 20px;
36 }
37
38 .container {
39   max-width: 1200px;
40   margin: 0 auto;
41 }
42
43 header {
44   background: #0d1b28;
45   padding: 25px;
46   text-align: center;
47   border-radius: 15px;
48   margin-bottom: 25px;
49   box-shadow: 0 8px 32px #0d1b28;
50   backdrop-filter: blur(4px);
51   border: 1px solid #1a2b3c;
52 }
53

```

Fonte: Próprio Autor (2025)

Na parte lógica, utilizou-se Java Script para programar as funções do aplicativo. Com ele, implementei a leitura das imagens carregadas, a exibição em tela e a lógica básica de comparação. Também fiz testes diretamente no navegador do celular para garantir que o sistema estivesse funcionando de forma rápida e prática.

Após validar a versão inicial, foram feitos ajustes no design e na usabilidade, corrigindo detalhes de alinhamento e cores para melhorar a visualização. Para que fosse utilizado como um aplicativo no celular, a aplicação foi configurada como um PWA (*Progressive Web App*), possibilitando que fosse instalada como um app nativo, mas sem a necessidade de publicação em loja de aplicativos.

Foi adicionado diferentes celulares, observando se a interface se adaptava bem a cada tamanho de tela. Com isso, finalizou-se uma primeira versão funcional do aplicativo como ilustrado na figura 68.

Figura 67 - Tela aplicativo



Fonte: Próprio Autor (2025)

Para facilitar a interpretação dos resultados pelo operador, o aplicativo incorpora uma barra de porcentagem que representa o estado geral da solda — variando de ruim a excelente — de forma visual e intuitiva conforme apresentado pela figura 68.

Figura 68- Análise solda 1



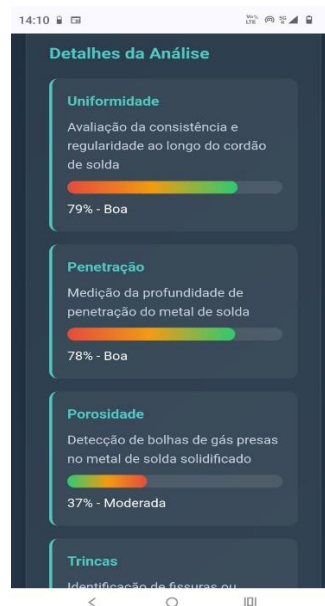
Fonte: Próprio Autor (2025)

Além disso, foram implementadas escalas específicas para os principais parâmetros de qualidade:

- Porosidade
- Penetração
- Trincas
- Uniformidade do cordão

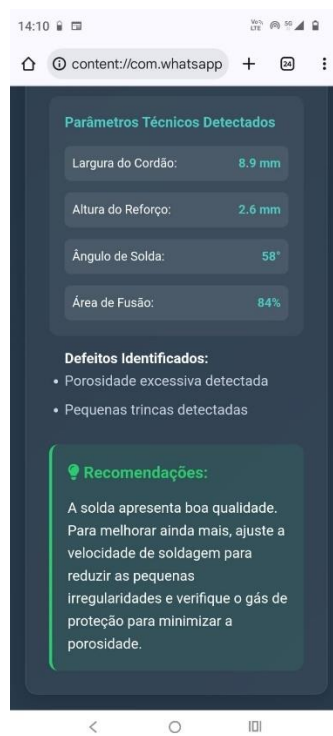
Essas escalas tornam a interface mais simples e acessível, permitindo uma leitura rápida e precisa dos dados. Com base nos resultados obtidos, o próprio aplicativo fornece sugestões automáticas de melhoria, orientando o operador sobre ajustes necessários para otimizar a qualidade da solda.

Figura 69 Parâmetros do aplicativo



Fonte: Próprio Autor (2025)

Figura 70 - Recomendações de possíveis soluções



Fonte: Próprio Autor (2025)

## 5 RESULTADOS DAS ANALISES DO APLICATIVO

Nesta seção são apresentados os testes práticos realizados com o aplicativo, aplicados a diferentes tipos de solda. O objetivo desses testes é avaliar o desempenho do sistema quanto à sua capacidade de identificar, classificar e diferenciar as condições das juntas soldadas, considerando variações nos processos de soldagem e nas características visuais das discontinuidades. Os resultados obtidos permitem verificar a efetividade do aplicativo no contexto da inspeção visual, bem como sua aplicabilidade em ambientes industriais com diferentes parâmetros de soldagem.

Na Figura 71 apresenta-se a imagem de uma solda realizada pelo processo de eletrodo revestido, na qual o metal de adição utilizado foi um eletrodo de inox 306. Visualmente, a solda demonstra um aspecto coeso e de boa aparência geral, embora sejam observadas mordeduras pontuais ao longo do cordão, possivelmente decorrentes de variações no ângulo do eletrodo ou na velocidade de soldagem durante a execução.

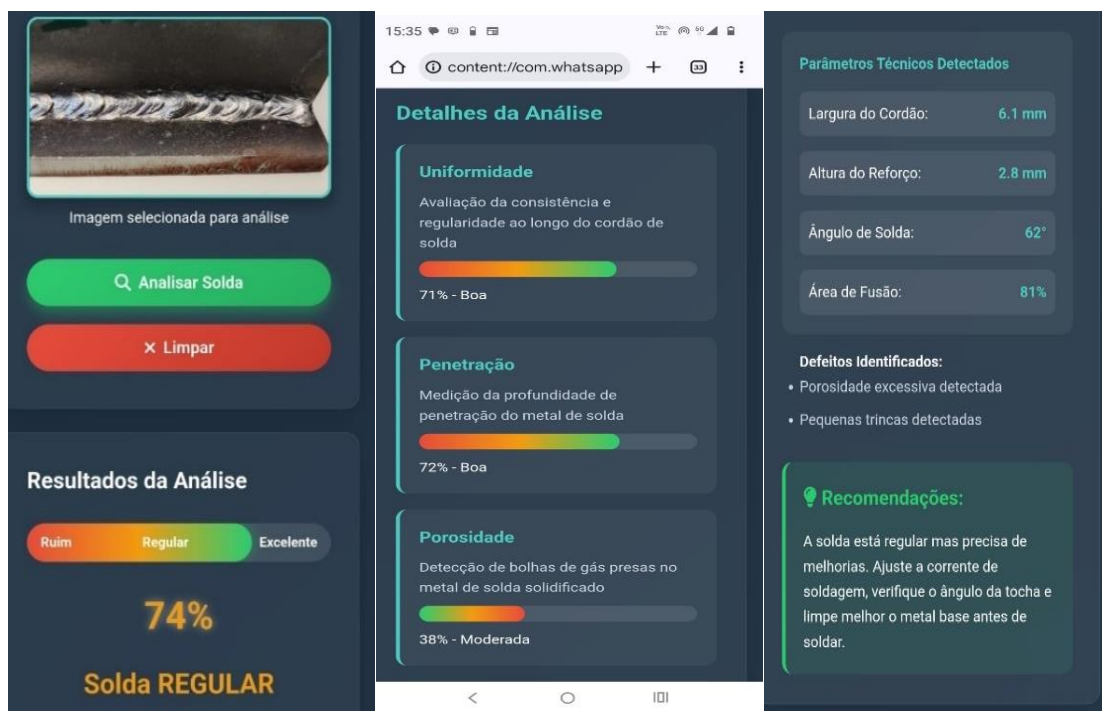
Figura 71 - Corpo de Prova 1



Fonte: Próprio Autor (2025)

Na Figura 72 temos a análise do aplicativo segundo a imagem capturada pelo celular do corpo de prova da figura 71.

Figura 72 Análise 1



Fonte: Próprio Autor (2025)

Na Figura 72 apresenta-se o resultado fornecido pelo aplicativo, que caracterizou a solda como regular, obtendo 74% na escala de classificação. Apesar de visualmente a solda ser considerada boa, observa-se uma incoerência entre o metal de base e o metal de adição, pois a base é de aço ao carbono e o metal de adição foi o aço inox 306, isso influencia o desempenho do modelo na avaliação da qualidade. Essa discrepância indica que o sistema ainda é sensível a variações metalúrgicas e de textura superficial, reforçando a necessidade de um banco de dados mais representativo para aprimorar a acurácia da classificação. Mas mesmo assim no contexto metalúrgico e prático o aplicativo foi coerente, pois o metal base não pode ser diferente do metal de adição.

Na Figura 73 apresenta-se a repetição do mesmo procedimento aplicado ao corpo de prova ilustrado na Figura 71. Trata-se de uma solda obtida pelo processo de eletrodo revestido, na qual o metal de adição utilizado foi um eletrodo de inox 306.

Visualmente, a solda apresenta aspecto bom e coeso, porém com a presença de mordeduras localizadas, o que pode indicar pequenas irregularidades no controle do arco elétrico ou na velocidade de avanço durante a execução do cordão.

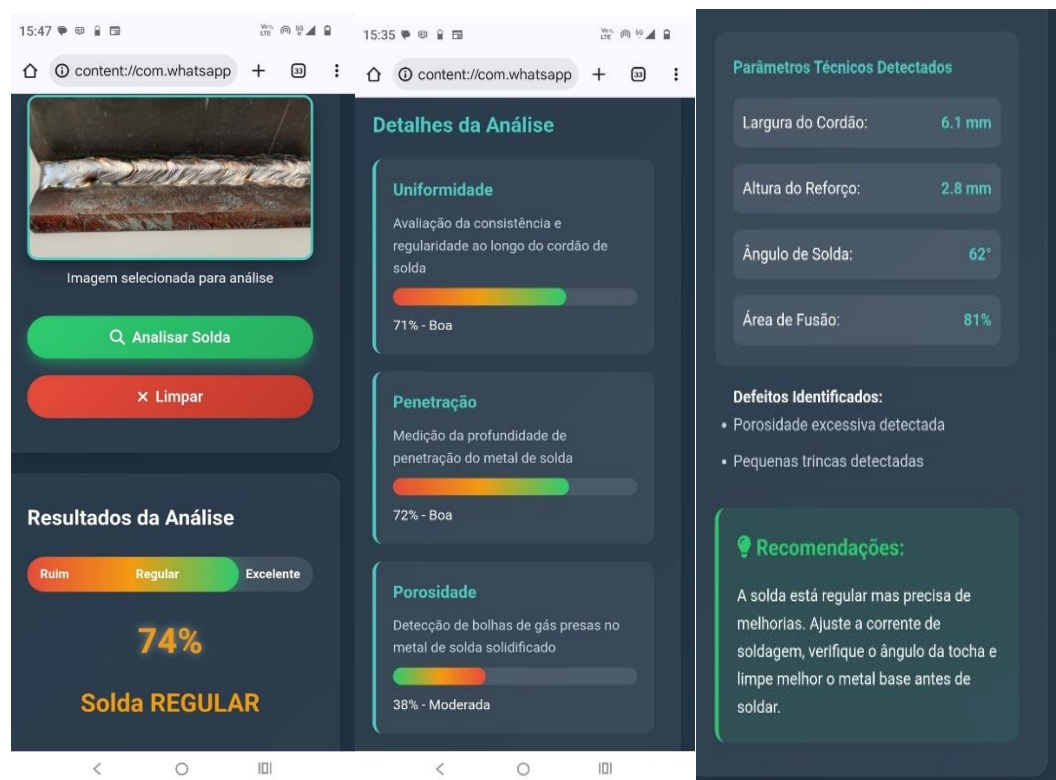
Figura 73 - Corpo de Prova 2



Fonte: Próprio Autor (2025)

Na Figura 74 temos a análise do aplicativo segundo a imagem capturada pelo celular do corpo de prova da figura 73.

Figura 74 - Análise 2



Fonte: Próprio Autor (2025)

Na Figura 74 apresenta-se o resultado fornecido pelo aplicativo, que caracterizou a solda como regular, obtendo 74% na escala de classificação, observa-se a repetição da mesma falha identificada no primeiro cordão de solda. Ressalta-se que a execução foi realizada pelo mesmo operador, utilizando os mesmos parâmetros de solda, o que resultou em um padrão de solda semelhante e, conseqüentemente, no mesmo índice de classificação obtido pelo aplicativo 74% na escala de análise. Esse resultado indica consistência no comportamento do sistema frente a condições de soldagem semelhantes, mas também evidencia a necessidade de ajustes no modelo para melhor sensibilidade a pequenas variações de qualidade.

Na Figura 75 apresenta-se a imagem de uma solda realizada pelo processo de eletrodo revestido, na qual o início do cordão apresenta boa aparência e coesão, porém, a partir da metade até o final, observam-se presença de escória aderida e formação de bolhas. Essas discontinuidades indicam falhas durante a execução e variações na estabilidade do arco elétrico, fatores que comprometem a uniformidade e a qualidade final da solda.

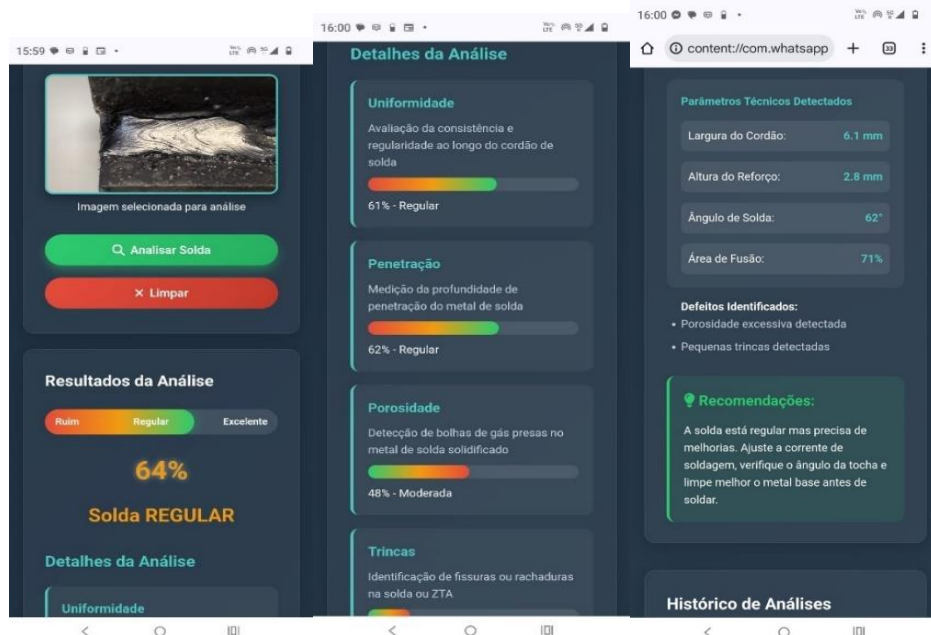
Figura 75 - Corpo de Prova 3



Fonte: Próprio Autor (2025)

Na Figura 76 temos a análise do aplicativo segundo a imagem capturada pelo celular do corpo de prova da figura 75.

Figura 76 Análise 3



Fonte: Próprio Autor (2025)

Na Figura 76 apresenta-se o resultado fornecido pelo aplicativo, que caracterizou a solda como regular, obtendo 64% na escala de classificação. Esse valor indica uma condição intermediária de qualidade, que pode ser considerada aceitável ou não, dependendo da exigência e da aplicação do componente soldado. Assim, o resultado classificado como “regular” encontra-se dentro do esperado para a amostra analisada, refletindo coerência entre a avaliação visual e a resposta do aplicativo.

Na Figura 77 apresenta-se uma solda realizada pelo processo de eletrodo revestido, onde existem múltiplas discontinuidades, incluindo bolhas, vazios e regiões com falta de fusão. Essas imperfeições comprometem significativamente a integridade mecânica da junta soldada, indicando possíveis falhas no controle da poça de fusão, na limpeza da superfície e na regulação dos parâmetros de soldagem.

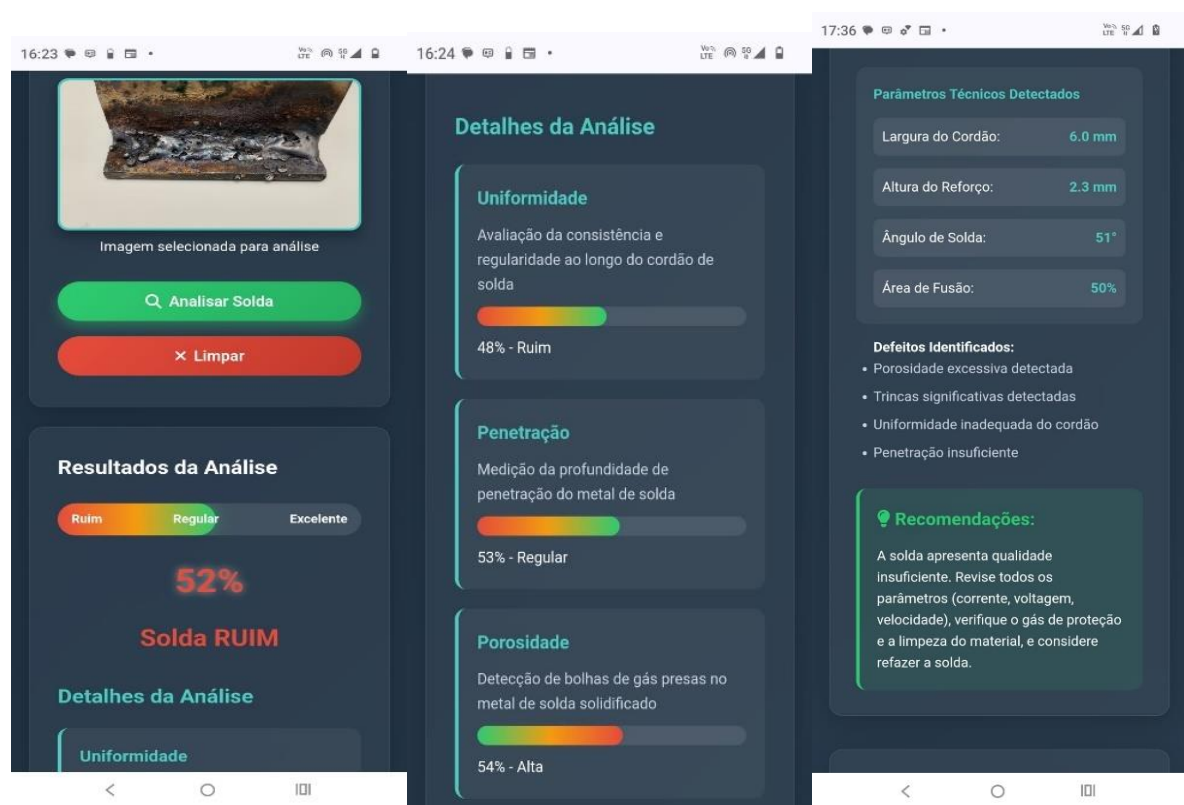
Figura 77 - Corpo de Prova 4



Fonte: Próprio Autor (2025)

Na Figura 78 temos a análise do aplicativo segundo a imagem capturada pelo celular do corpo de prova da figura 77.

Figura 78 - Análise 4



Fonte: Próprio Autor (2025)

Na Figura 79 apresenta-se uma solda com baixa qualidade, caracterizada pela presença de diversas discontinuidades ao longo do cordão. Observa-se que os parâmetros de soldagem não estavam adequadamente ajustados, o que resultou em defeitos visíveis e comprometimento da integridade da junta. Dessa forma, na figura 81 o aplicativo classificou a solda como “ruim”, demonstrando coerência entre a avaliação automatizada e a análise visual.

Na Figura 79 apresenta-se uma solda realizada pelo processo de eletrodo revestido, onde existem inclusão de escoria e bolhas, essas imperfeições comprometem a integridade mecânica da junta soldada, indicando falha falhas no controle da velocidade de soldagem, na limpeza da superfície.

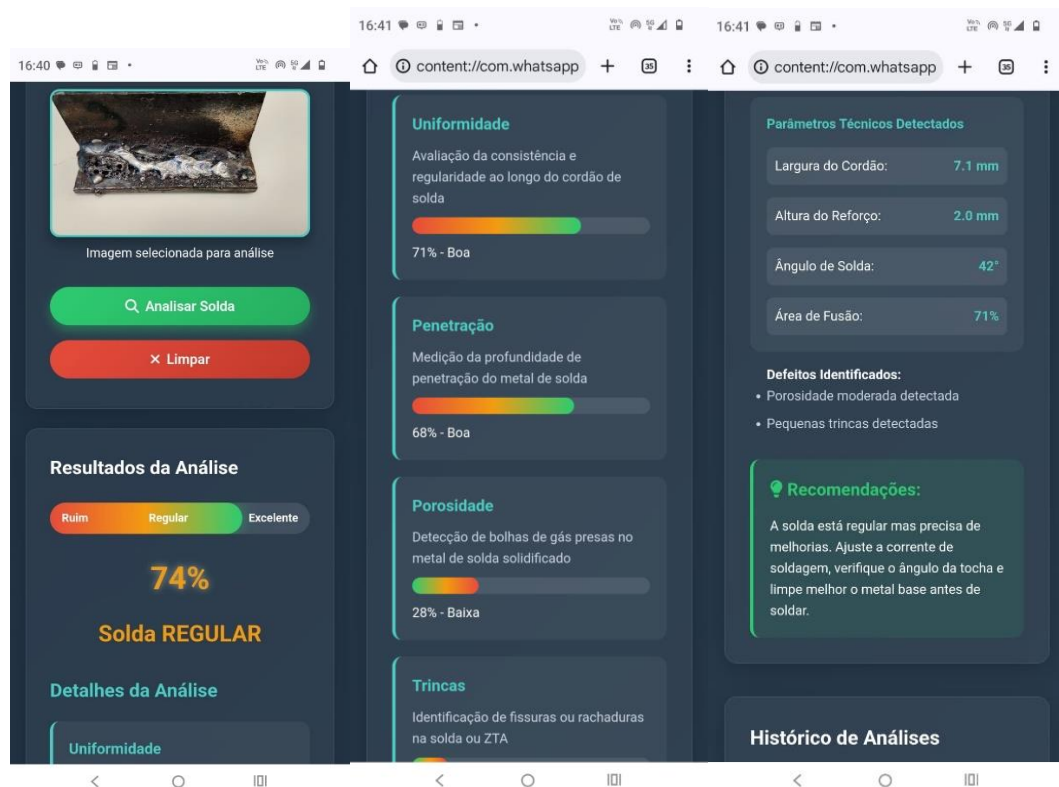
Figura 79 - Corpo de Prova 5



Fonte: Próprio Autor (2025)

Na Figura 80 temos a análise do aplicativo segundo a imagem capturada pelo celular do corpo de prova da figura 79.

Figura 80 - Análise 5



Fonte - Próprio Autor (2025)

Na figura 79 Observam-se algumas descontinuidades e imperfeições ao longo do cordão de solda, embora existam regiões com boa aparência superficial. Uma característica relevante é que, ao se considerar a posição da junta soldada, nota-se que a solda foi executada fora do alinhamento correto. Ainda assim, o aplicativo classificou a solda como “regular”, com 74% na escala de avaliação. Esse resultado mostra uma limitação do banco de dados utilizado no treinamento do modelo, uma vez que soldas desalinhadas deveriam ser classificadas como “ruins”, pois mesmo a solda estando correta ela foi colocada na junta, causando assim fragilidade a junção dos componentes.

Na Figura 81 apresenta-se um corpo de prova produzido pelo processo de eletrodo revestido, no qual são observadas inclusões de escória, falta de penetração e descontinuidade ao longo do cordão de solda. Essas imperfeições indicam erros no controle dos parâmetros de soldagem, relacionadas à velocidade de avanço inadequada, além de falta de preparo da junta soldada.

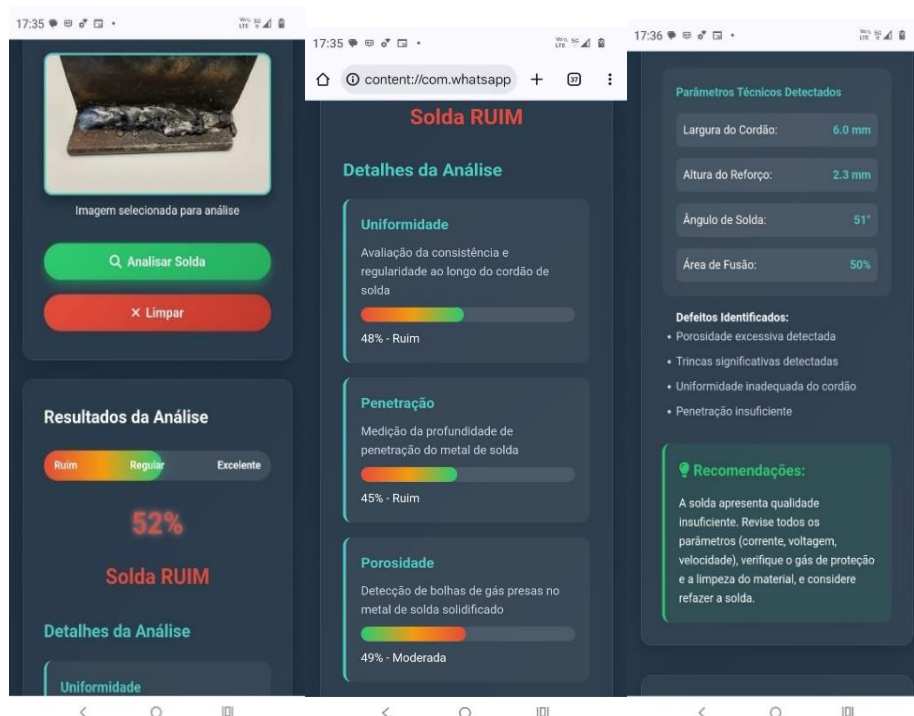
Figura 81 - Corpo de Prova 6



Fonte - Próprio Autor (2025)

Na Figura 81 temos a análise do aplicativo segundo a imagem capturada pelo celular do corpo de prova da figura 82.

Figura 82 - Análise 6



Fonte - Próprio Autor (2025)

O aplicativo, ao analisar essa amostra, classificou a solda como “ruim”, atribuindo 52% na escala de avaliação uma baixa pontuação

Essa classificação é coerente com a inspeção visual, confirmando que o sistema foi capaz de identificar corretamente as discontinuidades e refletir a perda de qualidade na soldagem.

Na Figura 83 apresenta-se um corpo de prova produzido pelo processo de soldagem MAG, utilizando arame de solda com diâmetro de 1,2 mm e proteção gasosa de CO<sub>2</sub>. Observa-se uma solda coesa e bem conformada, com a presença de uma discontinuidade ao final do cordão e alguns respingos dispersos. Tais características indicam um bom controle dos parâmetros de soldagem, embora pequenos ajustes na velocidade de avanço possam eliminar as irregularidades residuais.

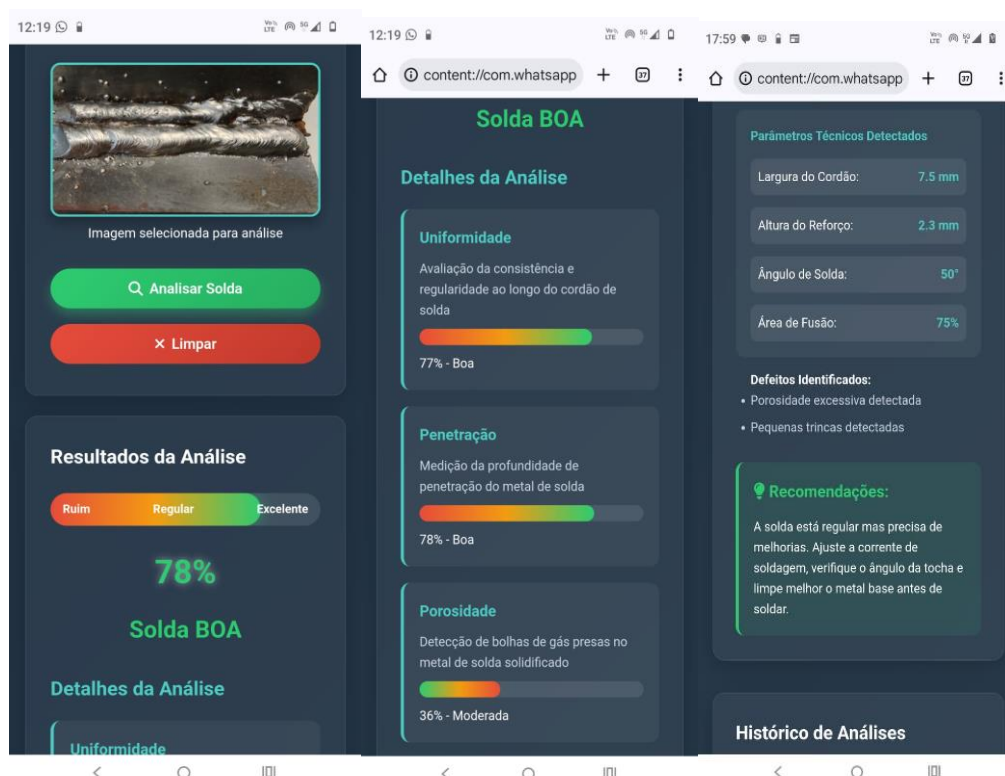
Figura 83- Corpo de Prova 7



Fonte - Próprio Autor (2025)

Na Figura 84 temos a análise do aplicativo segundo a imagem capturada pelo celular do corpo de prova da figura 83.

Figura 84 - Corpo de prova 7



Fonte - Próprio Autor (2025)

Na Figura 84 apresenta-se o resultado da análise realizada pelo aplicativo, que classificou a solda como boa, obtendo 78% na escala de avaliação. Esse valor demonstra coerência com a inspeção visual, visto que a solda apresenta boa coesão e conformidade geométrica, com apenas pequenas imperfeições no fim do segundo

Na Figura 85, tem uma junta soldada por meio do processo de eletrodo revestido, apresentando boa qualidade no cordão de solda. No entanto, o corpo de prova está inadequado, pois a operação foi realizada sobre uma solda previamente existente e sobre respingos anteriores, o que compromete aspectos estruturais e metalúrgicos da união.

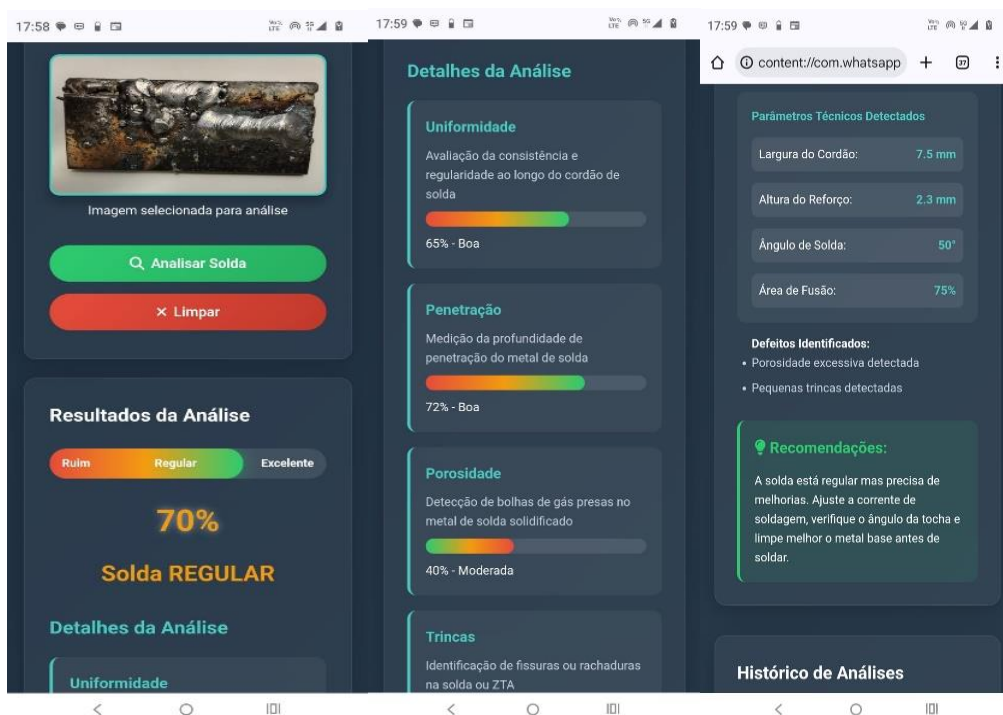
Figura 85 - Corpo de Prova 8



Fonte - Próprio Autor (2025)

Na Figura 86 temos a análise do aplicativo segundo a imagem capturada pelo celular do corpo de prova da figura 85.

Figura 86 - Análise 8



Fonte - Próprio Autor (2025)

Na Figura 86 apresenta-se o resultado da análise realizada pelo aplicativo, que classificou a solda como regular, obtendo 70% na escala de avaliação. Esse valor demonstra coerência com a inspeção visual, visto que a solda apresenta boa coesão e conformidade geométrica, mas o corpo de prova onde foi realizada a amostra esta incoerente, podendo afetar a resistência da junta soldada.

Na Figura 87, tem uma junta soldada por meio do processo mig/mag, apresentando boa qualidade no cordão de solda. Boa continuidade sem defeito aparente, o corpo de prova está adequado.

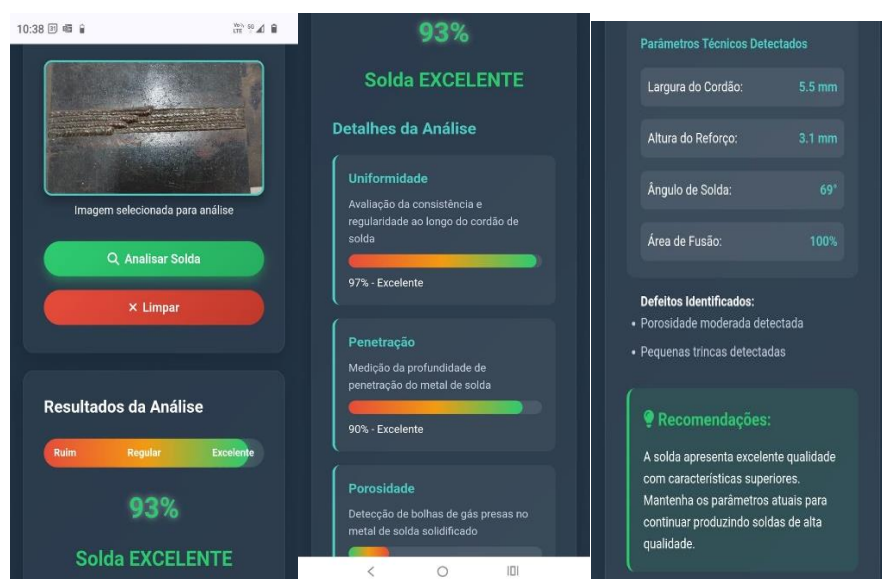
Figura - 87 Corpo de Prova 9



Fonte - Próprio Autor (2025)

Na Figura 88 temos a análise do aplicativo segundo a imagem capturada pelo celular do corpo de prova da figura 87.

Figura 88 Análise 9



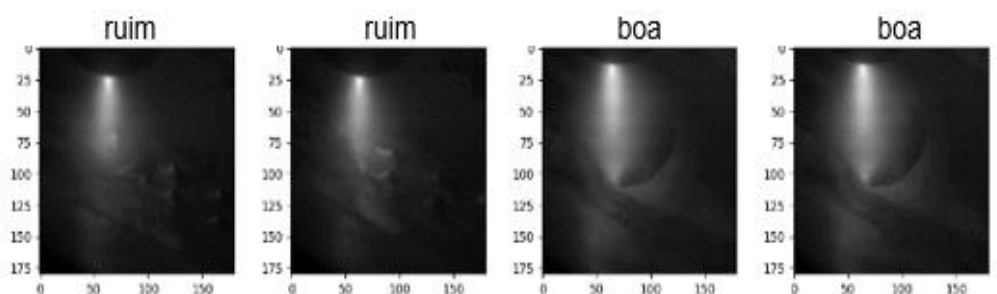
Fonte - Próprio Autor (2025)

Na Figura 88 apresenta-se o resultado da análise realizada pelo aplicativo, que classificou a solda como boa, obtendo 93% na escala de avaliação. Esse valor demonstra coerência com a inspeção visual, visto que a solda apresenta boa coesão e conformidade geométrica, sem imperfeições ou defeitos.

## 6 DISCUSSÃO

Na Figura 89, apresentam-se os resultados obtidos pela classificação da rede neural convolucional. A classificação realizada foi precisa, correspondendo adequadamente às imagens analisadas em relação ao tipo de solda. A rede neural demonstrou desempenho satisfatório ao classificar as imagens aleatórias com as imagens que foram treinadas no banco de dados, não apresentando erros durante o processo. Todas as amostras foram corretamente identificadas quanto à condição da solda (boa ou ruim). Além disso, destaca-se a elevada velocidade de processamento da rede, significativamente superior à capacidade de análise humana.

Figura 89 - Resultado Rede Neural



Fonte- Próprio Autor 2025

A utilização de um software de acesso gratuito eliminou os custos relacionados à aquisição dele. O processamento das imagens foi realizado na plataforma Google Colab, não havendo necessidade de infraestrutura computacional de alto desempenho ou de servidores dedicados.

No que se refere ao desempenho do modelo, observa-se na figura 90, que o aumento no número de épocas de treinamento resultou em maior precisão da rede neural. Essa tendência foi evidenciada pela análise da curva de perda (*loss function*), que apresentou redução progressiva à medida que o treinamento foi prolongado, refletindo a melhoria na capacidade de generalização do modelo.

Na figura 91 existe rápida convergência da acurácia de treinamento, atingindo 98% em poucas épocas. No entanto, a acurácia de validação mantém-se consistentemente alta (~99,8%) desde o início, sugerindo a possibilidade sobre ajuste ou configuração inadequada da separação entre os conjuntos de dados. Esse comportamento merece atenção, visto que um desempenho irrealisticamente alto na

validação pode mascarar falhas na generalização do modelo em aplicações reais, embora que também temos que nos atentar que a solda sempre possui o mesmo padrão, ou seja ela é realmente idêntica umas as outras.

O eixo X representa o número de épocas (ou ciclos completos de treinamento), enquanto o eixo Y mostra a acurácia (variando de 82% a 100%).

A linha azul indica a acurácia do modelo sobre os dados de treinamento. Nota-se um crescimento expressivo nas primeiras épocas, partindo de cerca de 82% e atingindo quase 99% ao final da quinta época. Isso indica que o modelo está aprendendo bem a distinguir as classes com base nos exemplos vistos.

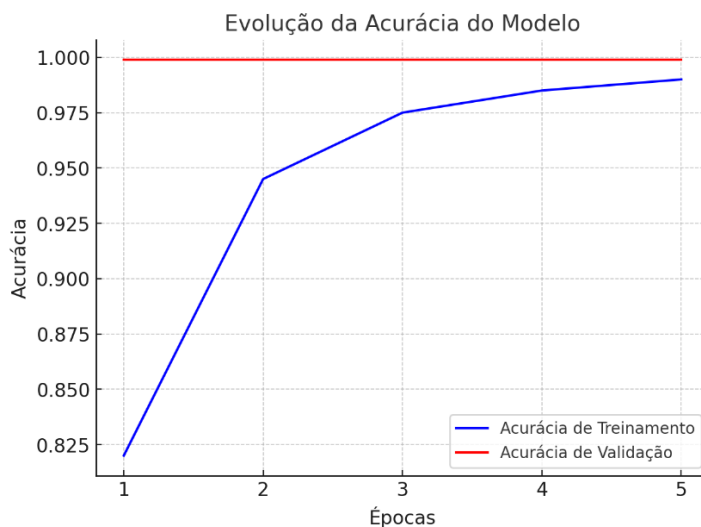
A linha vermelha representa a acurácia nos dados de validação, ou seja, exemplos que não foram utilizados diretamente no ajuste dos pesos da rede. A acurácia de validação se mantém extremamente alta e estável desde a primeira época (~99,8%).

Esse comportamento pode sugerir duas situações:

- O modelo está muito bem ajustado ao problema, com generalização excelente para dados não vistos.
- Pode haver sobre ajuste (overfitting) ou vazamento de dados (data leakage), ou seja, os dados de validação podem estar muito semelhantes aos de treinamento ou até mesmo conter exemplos compartilhados.

Essa análise é crucial para a avaliação da capacidade real de generalização do modelo, especialmente em aplicações industriais, médicas ou de inspeção automatizada, onde decisões baseadas em IA precisam ser robustas e confiáveis.

Figura 90 – Evolução da Acurácia do modelo



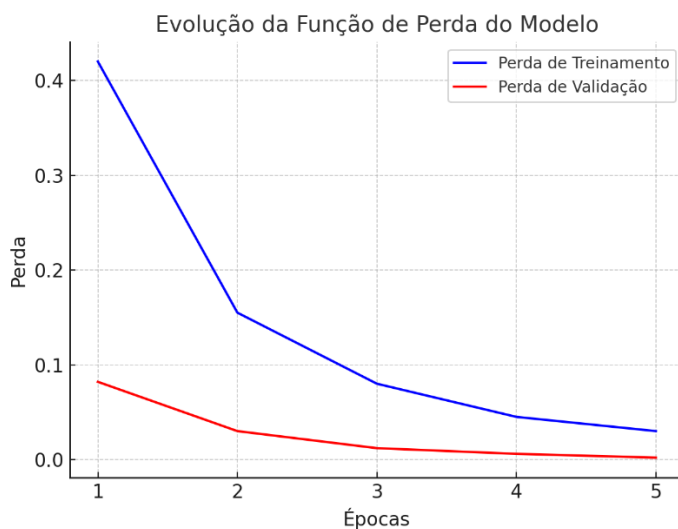
Fonte - Próprio Autor 2025

A Figura 91 apresenta a evolução da função de perda (*loss function*) durante as épocas de treinamento. Observa-se que a perda de treinamento (linha azul) apresentou redução acentuada nas primeiras épocas, decrescendo de aproximadamente 0,42 para valores próximos de 0,03 ao final da quinta época. Esse comportamento indica que a rede neural conseguiu ajustar seus parâmetros de forma progressiva, reduzindo o erro entre as predições e os rótulos reais.

De maneira semelhante, a perda de validação (linha vermelha) também apresentou redução consistente, partindo de valores próximos de 0,08 e aproximando-se de zero ao final do treinamento. A proximidade entre as curvas de treinamento e validação sugere que o modelo apresentou boa capacidade de generalização, sem indícios significativos de overfi

Portanto, pode-se concluir que a configuração adotada para o treinamento (número de épocas, taxa de aprendizado e arquitetura da rede) foi adequada, permitindo a convergência do modelo e garantindo resultados robustos em termos de acurácia e estabilidade do aprendizado.

Figura 91 - Perda do modelo



Fonte - Próprio Autor 2025

Após esta etapa temos o resultado proveniente do aplicativo a partir das imagens fotografadas com o celular e processadas por ele.

Figura 92 solda analisada I



Fonte - Próprio Autor 2025

A Figura 92 apresenta a interface do aplicativo desenvolvido para avaliação automática da qualidade de soldas. O sistema possibilita ao usuário carregar uma imagem da solda a ser inspecionada, que é processada por um modelo de classificação baseado em técnicas de visão computacional.

Na parte superior da tela observa-se a área destinada à visualização da imagem selecionada para análise. Em seguida, o aplicativo disponibiliza duas opções principais: “Analisar Solda”, que aciona o algoritmo de processamento e classificação, e “Limpar”, que reinicia o processo de seleção.

Os resultados da análise são exibidos em formato gráfico e numérico. No caso ilustrado, o sistema atribuiu 80% de conformidade, classificando a solda como BOA. Essa classificação está inserida em uma escala que varia entre três níveis de qualidade: Ruim, Regular e Excelente.

A representação em escala de cores (vermelho → laranja → verde) facilita a interpretação por parte do usuário, permitindo uma avaliação rápida e intuitiva da condição da solda. Além disso, há a possibilidade de acessar “Detalhes da Análise”, que são informações adicionais sobre os critérios utilizados pelo modelo, como aspectos geométricos, uniformidade do cordão e presença de discontinuidades. Na Figura 93, observam-se os seguintes parâmetros avaliados os quais são parâmetros bases para verificação da qualidade da solda.

### 1. Uniformidade

Refere-se à consistência e regularidade ao longo do cordão de solda. O resultado foi de 80%, classificado como BOA, indicando que o cordão apresenta variações perceptíveis, o que pode comprometer a estética e a resistência da junta.

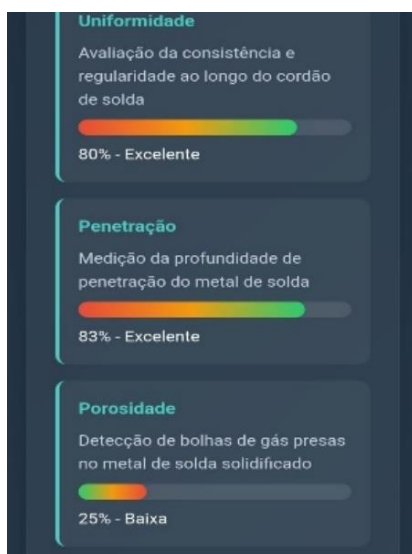
### 2. Penetração

Mede a profundidade de fusão e integração do metal de solda com o metal de base. O valor obtido foi de 83%, também classificado como BOA. Isso sugere que a solda não atingiu uma penetração ótima, podendo haver risco de falhas mecânicas em esforços de cisalhamento ou tração.

### 3. Porosidade

Corresponde à presença de bolhas de gás presas no cordão de solda após a solidificação. O sistema identificou 25%, classificado como Baixa. Esse resultado é crítico, pois porosidade elevada compromete a integridade estrutural e pode reduzir a vida útil da solda.

Figura 93 - Detalhe solda analisada I



Fonte - Próprio Autor (2025)

De forma geral pode-se comprovar a eficácia e eficiência da ferramenta proposta, evidenciando sua capacidade de traduzir resultados complexos de classificação em uma interface simples e acessível ao usuário, reforçando a contribuição do trabalho para o campo da inspeção de soldas.

Os resultados dos testes efetuados evidenciam a aplicabilidade do aplicativo, em diversos cenários e também mostram a fragilidade em relação ao banco de dados além de que o campo da soldagem é muito amplo e possuem inúmeras variáveis em diversos processos e situações.

## 7 CONCLUSÕES

Como pode se verificar a rede neural se mostrou plenamente eficiente, atingindo as expectativas e realizando a classificação com sucesso.

Sendo assim ela será de grande importância para otimização do processo de soldagem tornando a inspeção das soldas mais rápida e eficiente.

É de extrema importância inserir uma classificação por imagem na área metal mecânica para acelerarmos os processos tornando cada vez mais eficientes, confiáveis e econômicos.

O desenvolvimento do aplicativo demonstrou resultados satisfatórios na sua utilização, além da sua interface simples que se refere à sua aplicabilidade prática.

Com o aplicativo mesmo um usuário leigo, sem formação técnica em soldagem (ou área correlata), é capaz de realizar inspeções básicas a partir da interface proposta, o que evidencia o potencial da ferramenta como recurso de apoio à avaliação da qualidade de soldas.

Entretanto, verificou-se que o desempenho do sistema está diretamente relacionado à disponibilidade e à qualidade do banco de dados utilizado no treinamento do modelo. Para diferentes aplicações industriais, torna-se necessário o uso de bases de dados específicas, que considerem as particularidades de cada processo e dos materiais empregados.

Outro ponto a ser considerado é que, na versão atual, o aplicativo não realiza a diferenciação entre processos de soldagem distintos, como MIG/MAG, TIG ou eletrodo revestido. Essa limitação impacta a precisão dos resultados, uma vez que cada processo apresenta características próprias de cordão, penetração e ocorrência de discontinuidades. Dessa forma, o modelo requer calibração adicional e ajustes nos critérios de classificação, de modo a ampliar sua robustez e confiabilidade.

Os resultados obtidos indicam que a proposta é viável e possui relevância prática e acadêmica. Contudo, a continuidade deste trabalho deve contemplar a expansão do banco de dados, a diferenciação entre processos de soldagem e a otimização da calibração do modelo, garantindo maior precisão e aplicabilidade em cenários industriais diversificados, mas no momento a utilização para um melhor resultado tem de ser aplicado a processos específicos

## REFERÊNCIAS

- A wall climbing robot based on machine vision for automatic welding seam inspection, 2024. . Ocean Engineering 310, 118825.  
<https://doi.org/10.1016/j.oceaneng.2024.118825>
- Afzal, M.S., Wakeel, A., Nasir, M.A., Qazi, M.I., Abas, M., 2024. Optimization of process parameters for shielded metal arc welding for ASTM A 572 grade 50. Journal of Engineering Research. <https://doi.org/10.1016/j.jer.2024.01.005>
- AMARAL, 2021. INTELIGÊNCIA ARTIFICIAL: o uso da robótica na indústria 4.0. APLICABILIDADE DA INTELIGÊNCIA ARTIFICIAL NA ÁREA MÉDICA | Anais do UNIC - Congresso Regional de Práticas Investigativas [WWW Document], n.d. URL <https://periodicos.unifev.edu.br/index.php/unic/article/view/868> (accessed 3.9.25).
- AUER, P., Burgsteiner, H., Maass, W., 2008. A learning rule for very simple universal approximators consisting of a single layer of perceptrons. Neural Networks 21, 786–795. <https://doi.org/10.1016/j.neunet.2007.12.036>
- BAGHEL, P.K., 2022. Effect of SMAW process parameters on similar and dissimilar metal welds: An overview. Heliyon 8, e12161.  
<https://doi.org/10.1016/j.heliyon.2022.e12161>
- BARETT, G., Crouzet-Vincent, S., Gatto, F., Roche, F., Dufour, X., 2014. Ergonomia e fisioterapia. EMC - Medicina Riabilitativa 21, 1–14.  
[https://doi.org/10.1016/S1283-078X\(14\)68023-8](https://doi.org/10.1016/S1283-078X(14)68023-8)
- BEZERRA E XÊNIS, R., Xênia de Castro Barbosa, 2020. BREVE INTRODUÇÃO À HISTÓRIA DA INTELIGÊNCIA ARTIFICIAL.
- BRASIL, B. do, n.d. 7 defeitos mais comuns na soldagem, causas e soluções [WWW Document]. URL <https://blog.binzel-abicor.com/pt/7-defeitos-mais-comuns-na-soldagem-causas-e-soluções> (accessed 4.6.25).
- CHEN, H., Tianli, Z., Zhu, Z., Xu, L., Lin, S., Yang, S., Kou, S., 2024. Study on the effect of Ar–He shielding gas on the weld formation, microstructure and mechanical properties of 5083 aluminum alloy weld. Journal of Materials Research and Technology 28, 683–694. <https://doi.org/10.1016/j.jmrt.2023.11.271>
- CHEN, Y., Wang, J., Wang, G., 2023. Intelligent Welding Defect Detection Model on Improved R-CNN. IETE Journal of Research.
- Dhruva Kumar, D., Fang, C., Zheng, Y., Gao, Y., 2023. Semi-supervised transfer learning-based automatic weld defect detection and visual inspection. Engineering Structures 292, 116580. <https://doi.org/10.1016/j.engstruct.2023.116580>
- Digimeta([s.d]), n.d. História da Soldagem: da origem até sua evolução! [WWW

- Document]. Aços Nobre em Sorocaba. URL <https://acosnobre.com.br/blog/historia-da-soldagem/> (accessed 4.2.25).
- Enslin, S., Kaul, V., 2025. Past, Present, and Future: A History Lesson in Artificial Intelligence. *Gastrointestinal Endoscopy Clinics of North America, Artificial Intelligence in Endoscopy* 35, 265–278. <https://doi.org/10.1016/j.giec.2024.09.003>
- ESAB, n.d. ESAB [WWW Document]. SOUTH AMERICA PORTUGUESE. URL [https://esab.com/sam\\_pt/support/tools/resources/catalogos-de-produtos-esab/](https://esab.com/sam_pt/support/tools/resources/catalogos-de-produtos-esab/) (accessed 4.4.25).
- FACURE, mateus, 2017a. Redes Neurais <em>Feedforward</em> Densas [WWW Document]. URL <https://matheusfacure.github.io/2017/05/15/deep-ff-ann/> (accessed 4.8.25).
- FACURE, mateus, 2017b. Funções de Ativação [WWW Document]. URL <https://matheusfacure.github.io/2017/07/12/activ-func/> (accessed 4.8.25).
- FAGUNDES, 2018. Fundamentos de soldagem I. SESI SENAI Editora.
- FAN, D., Wang, Y., Zhang, C., Huang, J., Li, D., 2024. Numerical analysis of arc-droplet-pool coupling behavior in magnetically controlled high current MIG welding. *Journal of Manufacturing Processes* 126, 402–412. <https://doi.org/10.1016/j.jmapro.2024.07.124>
- FILHO, V.S.M., 2024. IA em Segurança Pública: Eficiência e Desafios Éticos [WWW Document]. fgi.edu.br. URL <https://www.fgi.edu.br/post/ia-em-seguranca-publica-eficiencia-e-desafios-eticos> (accessed 3.9.25).
- Filipsson, F., 2025. Primeiros programas de IA: o teórico da lógica e o solucionador geral de problemas [WWW Document]. URL <https://redresscompliance.com/early-ai-programs-the-logic-theorist-and-general-problem-solver/> (accessed 4.7.25).
- FLECK, Leandro, 2017. REDES NEURAIAS ARTIFICIAIS: PRINCÍPIOS BÁSICOS. *REDES NEURAIAS ARTIFICIAIS: PRINCÍPIOS BÁSICOS* 1, 47–57.
- GRZYBOWSKI, A., Pawlikowska-Łagód, K., Lambert, W.C., 2024. A History of Artificial Intelligence. *Clinics in Dermatology, Dermatology and Artificial Intelligence* 42, 221–229. <https://doi.org/10.1016/j.clindermatol.2023.12.016>
- GUIMARÃES, A.M., Mathias, I.M., Dias, A.H., Ferrari, J.W., Junior, C.R. de O.C., 2008. MÓDULO DE VALIDAÇÃO CRUZADA PARA TREINAMENTO DE REDES NEURAIAS ARTIFICIAIS COM ALGORITMOS BACKPROPAGATION E RESILIENT PROPAGATION - Doi: <http://dx.doi.org/10.5212/Publ.Exatas.v14i1.017024>. Publicatio UEPG: Ciências Exatas e da Terra, Agrárias e Engenharias - ATIVIDADES ENCERRADAS 14. <https://doi.org/10.5212/publicatio.v14i01.954>
- HAQUE, S.R., 2023. Investigation on welding defects of alloys using TIG and MIG welding.

- Hybrid Advances 3, 100066. <https://doi.org/10.1016/j.hybadv.2023.100066>
- HARRISON, N., 2024. 16 tipos comuns de defeitos de soldagem, causas, soluções. rapiddirect. URL <https://www.rapiddirect.com/pt/blog/types-of-welding-defects/> (accessed 3.11.25).
- IIDA, I., BUARQUE, L., 2021. Ergonomia: projeto e produção. Editora Blucher.
- JUNIOR et al, 2021. A ORIGEM DA SOLDAGEM – CONHEÇA SUA HISTÓRIA - Engrenar Jr. - Empresa Júnior da UFSCar [WWW Document]. URL <http://engrenarjr.com.br/blog/origem-da-soldagem/> (accessed 3.31.25).
- KAÇAR, R., KÖKEMLI, K., 2005. Effect of controlled atmosphere on the mig-mag arc weldment properties. Materials & Design 26, 508–516. <https://doi.org/10.1016/j.matdes.2004.07.027>
- KALAISELVAN, K., Dinaharan, I., Murugan, N., 2021. Routes for the Joining of Metal Matrix Composite Materials, in: Brabazon, D. (Ed.), Encyclopedia of Materials: Composites. Elsevier, Oxford, pp. 652–670. <https://doi.org/10.1016/B978-0-12-803581-8.11899-5>
- KANG, S., Lee, K., Kang, M., Jang, Y.H., Kim, C., 2023. Weld-penetration-depth estimation using deep learning models and multisensor signals in Al/Cu laser overlap welding. Optics & Laser Technology 161, 109179. <https://doi.org/10.1016/j.optlastec.2023.109179>
- KAUFMAN, D., 2022. Desmistificando a inteligência artificial. Autêntica Editora.
- Li, S., Wang, X., Dong, W., He, Q., An, B., Wang, P., Yang, B., 2025. Peridynamic analysis of rolling contact fatigue crack propagation in rail welding joints with pore defects. International Journal of Fatigue 190, 108612. <https://doi.org/10.1016/j.ijfatigue.2024.108612>
- LIU, T., Zheng, H., Zheng, P., Bao, J., Wang, J., Liu, X., Yang, C., 2023. An expert knowledge-empowered CNN approach for welding radiographic image recognition. Advanced Engineering Informatics 56, 101963. <https://doi.org/10.1016/j.aei.2023.101963>
- MAHAJAN, S., CHHIBBER, R., 2020. Investigação sobre escórias de revestimentos de eletrodos à base de CaO-CaF<sub>2</sub>-SiO<sub>2</sub>-Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> desenvolvidos para soldas de usinas de energia. Ceramics International 46, 8774–8786. <https://doi.org/10.1016/j.ceramint.2019.12.117>
- MARQUES, P.V., 2005. Soldagem - fundamentos e tecnologia. Editora UFMG.
- MESSLER JR, R.W., 2024. Principles of Welding: Processes, Physics, Chemistry, and Metallurgy. John Wiley & Sons.
- MODENESI, P.J., Matilde, S., Cançado, G.L.Q., Melo, C.E.D. de, 2012. Um programa de computador para simular alguns aspectos operacionais da soldagem MIG/MAG. Soldag. insp. 17, 32–39. <https://doi.org/10.1590/S0104-92242012000100006>

- Mogul, Y.I., Mogul, I., Quadros, J.D., Mohin, M., Aabid, A., Baig, M., Malik, M.A., 2025. Prediction of cutting depth in abrasive water jet machining of Ti-6AL-4V alloy using back propagation neural networks. *Results in Engineering* 25, 104520. <https://doi.org/10.1016/j.rineng.2025.104520>
- MOLEK, V., Alijani, Z., 2025. Fractional concepts in neural networks: Enhancing activation functions. *Pattern Recognition Letters* 190, 126–132. <https://doi.org/10.1016/j.patrec.2025.02.013>
- NASCIMENTO, A.S. do, Menezes Junior, L.C. de, Vilarinho, L.O., 2012. Efeito do formato de onda e gás de proteção sobre a taxa de fusão e geometria do cordão na soldagem MIG/MAG-PV. *Soldag. insp.* 17, 40–48. <https://doi.org/10.1590/S0104-92242012000100007>
- PARISI, L., Neagu, D., Ma, R., Campean, F., 2022. Quantum ReLU activation for Convolutional Neural Networks to improve diagnosis of Parkinson's disease and COVID-19. *Expert Systems with Applications* 187, 115892. <https://doi.org/10.1016/j.eswa.2021.115892>
- PRODEST - Veja como a inteligência artificial é utilizada em vários setores [WWW Document], n.d. URL <https://prodest.es.gov.br/veja-como-a-inteligencia-artificial-e-utilizada-em-varios-setores> (accessed 4.8.25).
- REIS, 2019a. Tipos De Inspeção De Soldagem: Tudo Que Você Precisa Saber. URL <https://inspesolda.com/tipos-de-inspecao-de-soldagem/> (accessed 3.9.25).
- REIS, 2019b. Tipos De Inspeção De Soldagem: Tudo Que Você Precisa Saber. URL <https://inspesolda.com/tipos-de-inspecao-de-soldagem/> (accessed 4.6.25).
- RITA, 2020. Guia Completo – Solda MIG MAG – Gases de Proteção [WWW Document]. [www.managas.com.br](http://www.managas.com.br). URL <https://www.managas.com.br/blog/corte-e-solda/guia-completo-solda-mig-mag-gases-de-protecao/> (accessed 4.5.25).
- ROUXING, C., Jianning, W., Basem, A., Hussein, R.A., Salahshour, S., Baghaei, S., 2025. Examining the application of strategic management and artificial intelligence, with a focus on artificial neural network modeling to enhance human resource optimization with advertising and brand campaigns. *Engineering Applications of Artificial Intelligence* 143, 110029. <https://doi.org/10.1016/j.engappai.2025.110029>
- SCLOSSER, A.E., Shavitt, S., Kanfer, A., 1999. Survey of Internet users' attitudes toward Internet advertising. *Journal of Interactive Marketing* 13, 34–54. [https://doi.org/10.1002/\(SICI\)1520-6653\(199922\)13:3<34::AID-DIR3>3.0.CO;2-R](https://doi.org/10.1002/(SICI)1520-6653(199922)13:3<34::AID-DIR3>3.0.CO;2-R)
- Sharma, A., Verma, A., Vashisth, D., Khanna, P., 2022. Prediction of bead geometry parameters in MIG welded aluminium alloy 8011 plates. *Materials Today*:

- Proceedings, International Conference on Materials, Processing & Characterization (13th ICMPC) 62, 2787–2793.  
<https://doi.org/10.1016/j.matpr.2022.02.063>
- SILVA, G., Fiorillo, A., Paiva, A., Rodrigues, M., Rodrigues, J., Gutierrez, G., Oliveira, L., Carvalho, L., Glória, G., Rêgo, D., 2024. UTILIZAÇÃO DE INTELIGÊNCIA ARTIFICIAL PARA IDENTIFICAR BIOMARCADORES COM INTUITO DE OTIMIZAR O TRATAMENTO DE PACIENTE COM LEUCEMIA MIELOIDE AGUDA. Hematology, Transfusion and Cell Therapy, HEMO 2024 46, S1095–S1096.  
<https://doi.org/10.1016/j.htct.2024.09.1919>
- THEODORIDIS, S., 2020. Chapter 18 - Neural Networks and Deep Learning, in: Theodoridis, S. (Ed.), Machine Learning (Second Edition). Academic Press, pp. 901–1038. <https://doi.org/10.1016/B978-0-12-818803-3.00030-1>
- Toolbox, 2022. Toxicidade de eletrodos de tungstênio toriados em soldagem [WWW Document]. Toolbox. URL <https://toolbox.energyinst.org/pt-pt/c/presentations/toxicity-of-thoriated-tungsten-electrodes-for-welding> (accessed 4.5.25).
- VARGAS, A.C.G., Carvalho, A.M.P., Vasconcelos, C.N., 2016. Um estudo sobre Redes Neurais Convolucionais e sua aplicac , ~ ao em detecc , ~ ao de pedestres 7.
- VER BERNE, J., Saadi, S.B., Oliveira-Santos, N., Marinho-Vieira, L.E., Jacobs, R., 2025. Automated classification of panoramic radiographs with inflammatory periapical lesions using a CNN-LSTM architecture. Journal of Dentistry 156, 105688.  
<https://doi.org/10.1016/j.jdent.2025.105688>
- WANG, J., Li, C., Yang, B., Shi, Y., Dai, Y., 2025. Melting pool visualization and penetration prediction study of TIG bottoming welding with narrow gap hot wire. Journal of Manufacturing Processes 133, 226–237.  
<https://doi.org/10.1016/j.jmapro.2024.11.055>
- WANG, M., Lu, S., Zhu, D., Lin, J., Wang, Z., 2018. A High-Speed and Low-Complexity Architecture for Softmax Function in Deep Learning, in: 2018 IEEE Asia Pacific Conference on Circuits and Systems (APCCAS). Presented at the 2018 IEEE Asia Pacific Conference on Circuits and Systems (APCCAS), pp. 223–226.  
<https://doi.org/10.1109/APCCAS.2018.8605654>
- Wang, P., Li, L., Li, X., Duan, L., Lü, Z., Di, R., 2025a. An automatic welding defect detection method based on deep learning for super 8-bit high grayscale X-ray films of solid rocket motor shells. NDT & E International 151, 103306.  
<https://doi.org/10.1016/j.ndteint.2024.103306>
- Wang, P., Li, L., Li, X., Duan, L., Lü, Z., Di, R., 2025b. An automatic welding defect detection method based on deep learning for super 8-bit high grayscale X-ray films of solid rocket motor shells. NDT & E International 151, 103306.  
<https://doi.org/10.1016/j.ndteint.2024.103306>

- WANG, X., Zscherpel, U., Tripicchio, P., D'Avella, S., Zhang, B., Wu, J., Liang, Z., Zhou, S., Yu, X., 2025. A comprehensive review of welding defect recognition from X-ray images. *Journal of Manufacturing Processes* 140, 161–180.  
<https://doi.org/10.1016/j.jmapro.2025.02.039>
- Xu, J., Li, Z., Du, B., Zhang, M., Liu, J., 2020. Reluplex made more practical: Leaky ReLU, in: 2020 IEEE Symposium on Computers and Communications (ISCC). Presented at the 2020 IEEE Symposium on Computers and Communications (ISCC), pp. 1–7.  
<https://doi.org/10.1109/ISCC50000.2020.9219587>
- YANG, Y., Yang, R., Pan, L., Ma, J., Zhu, Y., Diao, T., Zhang, L., 2020. A lightweight deep learning algorithm for inspection of laser welding defects on safety vent of power battery. *Computers in Industry* 123, 103306.  
<https://doi.org/10.1016/j.compind.2020.103306>
- YU, R., Zhang, T., Huang, Y., Peng, Y., Wang, K., 2025. Detection of variable-groove weld penetration based on cooperative awareness of melt pool vision and temperature field. *Optics & Laser Technology* 184, 112432.  
<https://doi.org/10.1016/j.optlastec.2025.112432>
- Zhang, R., Liu, D., Bai, Q., Fu, L., Hu, J., Song, J., 2024. Research on X-ray weld seam defect detection and size measurement method based on neural network self-optimization. *Engineering Applications of Artificial Intelligence* 133, 108045.  
<https://doi.org/10.1016/j.engappai.2024.108045>
- Zhang, Z., Wen, G., Chen, S., 2019. Weld image deep learning-based on-line defects detection using convolutional neural networks for Al alloy in robotic arc welding. *Journal of Manufacturing Processes* 45, 208–216.  
<https://doi.org/10.1016/j.jmapro.2019.06.023>
- ZHU, Y., Hu, Z., Luo, J., Song, P., 2024. Probabilistic fatigue life prediction using multi-layer perceptron with maximum entropy algorithm. *International Journal of Fatigue* 187, 108445. <https://doi.org/10.1016/j.ijfatigue.2024.108445>
- ZIEDAS, 2021. Pequeno Histórico da soldagem - Infosolda [WWW Document]. URL <https://infosolda.com.br/pequeno-historico-da-soldagem/> (accessed 3.31.25).
- Zuo, F., Liu, J., Fu, M., Wen, Z., 2025. An end-to-end intelligent welding defect detection system for low-quality X-ray images with adaptive progressive learning. *Expert Systems with Applications* 127428. <https://doi.org/10.1016/j.eswa.2025.127428>