UNIVERSIDADE SANTA CECÍLIA
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA MECÂNICA
MESTRADO EM ENGENHARIA MECÂNICA

ESTEVAN DE CAMPOS GONÇALVES

ANÁLISE DE CONDIÇÕES DE SOLDA AUTÓGENA ORBITAL AUTOMÁTICA ATRAVÉS DE IMAGENS DE MICROGRAFIA UTILIZANDO REDES NEURAIS ARTIFICIAIS PARACONSISTENTES

SANTOS/SP
2019

ESTEVAN DE CAMPOS GONÇALVES

ANÁLISE DE CONDIÇÕES DE SOLDA AUTÓGENA ORBITAL AUTOMÁTICA ATRAVÉS DE IMAGENS DE MICROGRAFIA UTILIZANDO REDES NEURAIS ARTIFICIAIS PARACONSISTENTES

Dissertação apresentada a Universidade Santa Cecília como parte dos requisitos para obtenção de título de mestre no Programa de Pós-Graduação em Engenharia Mecânica, sob a orientação da Profa. Dra. Dorotéa Vilanova Garcia.

SANTOS/SP
2019

Autorizo a reprodução parcial ou total deste trabalho, por qualquer que seja o processo, exclusivamente para fins acadêmicos e científicos.

Gonçalves, Estevan de Campos.
ANÁLISE DE CONDIÇÕES DE SOLDA AUTÓGENA ORBITAL AUTOMÁTICA ATRAVÉS DE IMAGENS DE MICROGRAFIA UTILIZANDO REDES NEURAIS ARTIFICIAIS PARACONSISTENTES. Estevan de Campos Gonçalves. – 2019.
n.paginas
59 p.

Orientadora: Profa. Dra. Dorotéa Vilanova Garcia

Dissertação (Mestrado) -- Universidade Santa Cecília, Programa de Pós-Graduação em Engenharia Mecânica, Santos, SP, 2019.

1. Solda orbital. 2. GTAW. 3. Metalografia. 4. Redes Neurais Artificiais Paraconsistente. 5. Inteligência Artificial.

I. Garcia, Dorotéa Vilanova. ANÁLISE DE CONDIÇÕES DE SOLDA AUTÓGENA ORBITAL AUTOMÁTICA ATRAVÉS DE IMAGENS DE MICROGRAFIA UTILIZANDO REDES NEURAIS ARTIFICIAIS PARACONSISTENTES.

Elaborada pelo SIBi – Sistema Integrado de Bibliotecas – Unisanta

DEDICATÓRIA

Dedico este trabalho à minha esposa Suzyane, aos meus filhos Milena, José Estevan e Isabel. Aos meus pais Gerson e Claudete por toda ajuda no começo de minha carreira.

AGRADECIMENTOS

Agradeço,

A orientadora Profa. Dra. Dorotéa Vilanova Garcia, pela paciência, orientação e dedicação no apoio técnico e experiência no que contribuiu para a elaboração deste trabalho.

Ao Prof. Dr. Maurício Conceição Mario pela idealização do projeto de análise de imagens digitais utilizando micrografia de soldagem e contribuição técnica para a lógica empregada.

Ao coordenador do curso Felipe Bertelli pela paciência e ajuda.

Ao técnico de laboratório Wilson Roberto de Oliveira Santos e ao Prof. MSc. Manoel Messias Neris por apoiar na execução das amostras de micrografia.

A empresa Tecflux Ltda por disponibilizar os equipamentos e material para amostras.

À UNIVERSIDADE SANTA CECÍLIA (UNISANTA) pela excelência no curso de mestrado em Engenharia Mecânica, o que me propiciou conhecimento técnico para a elaboração deste trabalho.

RESUMO

Em investigação e análise de soldagem, a metalografia é uma ferramenta de observação e inspeção. Esse processo se dá através de imagens digitais geradas por microscópio tornando possível a análises morfológicas e contagem de partículas, dessa forma, produzindo padrões, que podem ser comparados com outras imagens afim de se estabelecer similaridades. Os processos de soldagem através dos anos apresentaram progresso tecnológico surpreendedor, em particular no processo de soldagem *Gas Tungsten Arc Welding* (*GTAW*) autógeno orbital automático. Os métodos de inspeção e análise devem seguir pela mesma direção, a computação e a inteligência artificial, que são as ferramentas para essas conquistas e avanços, sendo a lógica o meio de desenvolvimento. Este trabalho traz um meio de classificação de imagens metalográficas de amostras de tubos de aço inoxidável 316L com aplicação de inteligência artificial. Nesta pesquisa foi aplicada Redes Neurais Artificiais Paraconsistentes (RNAPs) onde, o metal base, a zona termicamente afetada e o metal soldado são submetidos à análises morfológicas e de entropia gerando acertos e erros e interpretação dos resultados com as RNAPs. As amostras foram submetidas a três tipos de tratamento aumentando assim o range de interpretação desse estudo. Foram divididas em 3 grupos: Original 27 amostras; Austenitização 30 amostras; Reparo 30 amostras. O tratamento de Austenitização alcançou 100% de assertividade nas três regiões do metal. A solda original, no metal soldado, apresentou erro de 14% no tipo Metal Soldado, enquanto que nos outros dois tipos obteve 100% acerto e a de Reparo apresentou erro de 14% nas três regiões.

Palavras-Chave: Solda orbital, GTAW, metalografia, redes neurais artificiais paraconsistentes, inteligência artificial.

ABSTRACT

In welding investigation and analysis, metallography is a tool for observation and inspection. This process takes place through digital images generated by a microscope making possible morphological analysis and particle counting, thus producing standard samples that can be compared with other images in order to establish similarities. Welding processes over the years have presented surprising technological progress, particularly the automatic autogenous orbital welding using Gas Tungsten Arc Welding (GTAW). The methods of inspection and analysis must follow in the same direction, computing and artificial intelligence are the tools for these achievements and advances, with logic being the means of development. This study brings a method of metallographic image classification, samples of 316L stainless steel tubes, with application of artificial intelligence. In this research was applied Paraconsistent Artificial Neural Networks where the base metal, the thermally affected zone and the welded metal are submitted to morphological and entropy analysis, generating corrects and errors and results interpretation with PANCa. The samples were submitted to three types of treatment, thus increasing this study interpretation range. Were divided into 3 groups, Original 27 samples, Austenitization 30 samples and Repair 30 samples. Having the Austenitization treatment achieved 100% assertiveness in the three metal regions. The original weld, in the welded metal, presented a 14% error in Welded Metal type, while in the other two types it was 100% correct and the Repair showed a 14% error in the three regions.

Key Words: Orbital welding, GTAW, metallography, paraconsistent artificial neural networks, artificial intelligence.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1: – Processos de Soldagem 14
Figura 2: – Processo de soldagem GTAW 14
Figura 3: – Processo de soldagem orbital GTAW 16
Figura 4: – Posição 5G descendente/ascendente 16
Figura 5: – 3 regiões do material soldado MB, ZTA e MS 17
Figura 6: – Relação de Juntas 17
Figura 7: – Esquema do processo de solidificação de material policristalino monofásico. (a) Pequenos núcleos de cristalização, (b) crescimento dos núcleos de cristalização, (c) formação de grãos que possuem formatos irregulares, (d) estrutura dos grãos como aparecem no microscópio 27
Figura 8: – (a) aço inoxidável austenítico, (b) aço inoxidável ferrítico, (c) aço inoxidável martensítico, (d) aço inoxidável duplex e (e) aço inoxidável endurecido por precipitação. 189
Figura 9: – Figura com diagrama de equivalência de Cr/Ni. 20
Figura 10: – Classificação de algumas Lógicas 20
Figura 11: – Reticulado finito de quatro estados. 21
Figura 12: – (A) Célula Neural Artificial Paraconsistente de Conexão Lógica Analítica, (B) Representação simplificada da CNAPa 22
Figura 13: – Junta de topo utilizada nesse trabalho 24
Figura 14: – Método de acabamento faceamento da junta 27
Figura 15: – Fonte de solda modelo M200 Swagelok 28
Figura 16: – Conjunto para efetuar a soldagem Swagelok 28
Figura 17: – Eletrodo de Tungstênio CWS-C-040-555-P 28
Figura 18: – Painel de purga ID 29
Figura 19: – Cor que representa o gás e modelo 30
Figura 20: – Soldagem orbital e penetração total 31
Figura 21: – Amostra da solda original 32
Figura 22: – a) Temperatura do forno em 1050^{o}C durante 1 hora. b) Resfriamento lento dentro do forno durante 8 horas até atingir temperatura ambiente. c) Abertura do forno para retirada da amostra. d) Aparência final após o processo de resfriamento lento 33
Figura 23: – Solda sobre solda (reparo) 34
Figura 24: – Preparação de amostras para o processo de micrografia 35
Figura 25: – Geração do padrão de uma região de solda de um tipo 36
Figura 26: – Primeira etapa: Identificação da amostra 37
Figura 27: – Segunda etapa: Leitura dos padrões 38
Figura 28: – Terceira etapa: Evidência de cada região para cada tipo de solda 38
Figura 29: – Cálculo das camadas da CNAPa 39
Figura 30: – Quarta etapa: Evidência parcial para cada tipo de solda 39
Figura 31: – Quinta etapa: Extrator de evidência final do tipo de solda 42
Figura 32: – Saída Rede Paraconsistente Gerando Classificação da Amostra 43
Figura 33: – Geração das amostras da análise metalográfica 43
Figura 34: – Imagem Original e sua erosão 43
Figura 35: – Quantidade de partículas por tamanho 43

LISTA DE TABELAS

Tabela 1: Classificação do grau de pureza de gases comercializados 29
Tabela 2: Propriedades físico-químicas do Argônio 30
Tabela 3: Disponibilidade de Cilindros de grau 5.0 30
Tabela 4: Parâmetros de Soldagem Original.....33
Tabela 5: Parâmetros de Soldagem Reparo 34
Tabela 6: Processamento de cada tipo de solda gerando o respectivo padrão 44
Tabela 7: Classificação das Amostras.....45
Tabela 8: Resultados final das amostras classificadas 46

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

GTAW - *Gas Tungsten Arc Welding*

OFW - Soldagem com oxigênio-combustível

AMS - *American Welding Society*

TIG - *Tungsten Inert Gas*

ASTM – *American Society for Testing Materials*

CFC – Cúbico de Face Centrada

MB - Metal Base

ZTA - Zona Termicamente Afetada

MS - Metal Soldado

LPA2v – Lógica Paraconsistente Anotada de Anotação com Dois Valores

CNAPa – Célula Neural Artificial Paraconsistente

FISPQ – Ficha de Informação de Segurança para Produtos Químicos

ONU – Indicador produto químico industrializado padrão internacional

ABNT – Associação Brasileira de Normas Técnicas

RNAPs – Rede Neural Artificial Paraconsistente

LP – Lógica Paraconsistente

LISTA DE SÍMBOLOS

º - Graus

ºC – Graus celsius

% - porcentagem

Cr - Cromo

Mo - Molibdênio

Si - Silício

Ni - Níquel

C - Carbono

Mn - Manganês

μ - Grau de Evidência Favorável

λ - Graus de Evidência Desfavorável

l/min – Litros por minuto

ft3/h – pés cúbicos por hora

mm - milímetro

pol – polegada

psig – pressão manométrica (medida relativa à pressão atmosférica local)

bar – medida de pressão

SUMÁRIO

1 INTRODUÇÃO 13
1.1 Processo de Soldagem Gas Tungsten Arc Welding (GTAW) 13
1.1.1 Soldagem *GTAW* 13
1.1.2 Regiões e juntas 17
1.1.3 Características Metalográficas do Aço Inoxidável 18
1.2 Processamento de Imagens 20
1.3 Lógica Paraconsistente - LP 21
1.3.1 Lógica Paraconsistente Anotada - LPA 22
1.3.2 Lógica Paraconsistente Anotada com anotação de dois valores- LPA2v 23
1.3.3 Redes Neurais Artificiais Paraconsistentes 23
1.3.4 Célula Neural Artificial Paraconsistente de Conexão Lógica Analítica - CNAPa 23
1.4 Objetivo 24
1.5 Objetivos Secundários 24
1.6 Justificativa e Relevância do Tema 25
1.7 Organização da dissertação 25
2 MATERIAIS E MÉTODOS 26
2.1 Preparação das Amostras de Solda 26
2.2 Metodologia Utilizada para Processamento de Amostras 32
2.3 Rede Neural Artificial Paraconsistente 35
2.3.1 Geração do padrão por região e tipo 36
2.3.2 Metodologia para gerar classificação de uma amostra 37
3 RESULTADOS 42
4 DISCUSSÕES 47
5 CONCLUSÕES 49
REFERÊNCIAS 50
APENDICE - A 54
APENDICE - B 57

1 INTRODUÇÃO

O processo de soldagem existe desde a era do bronze até a era do aço, podendo ser estimada com idade entre 2.000 a.c. e 3.000 a.c. Processos de forjamento e martelamento podem ser considerados as primeiras formas de soldagem. Desde então vários processos de soldagem têm sido desenvolvidos.

Os avanços iniciais mais significantes nos processos de soldagem, se deram pela utilização do acetileno e formas de criar o arco elétrico. A David Knight, ‘Davy, Sir Humphry, Baronet (1778–1829), é creditado como o primeiro a descrever o fenômeno parecido com o arco elétrico. Entretanto, as primeiras tentativas de se usar arco elétrico com calor intenso foram feitas em 1881 por Augusti de Meriteus para soldar placas de chumbo de bateria (MacLEOD, 2008).

Soldagem por arco elétrico, como conhecido atualmente, iniciou-se com o desenvolvimento de eletrodo revestido no início de 1900. Aplicações de soldagem cresceram rapidamente após os anos 20 do século passada e mais aceleradamente no início da segunda guerra mundial, principalmente pela indústria aérea e naval. (VEIGA, 2011)

1.1 Processo de Soldagem *Gas Tungsten Arc Welding* (*GTAW*)

Nesse tópico serão discutidos os seguintes itens, a soldagem *GTAW*, destacando suas principais categorias e suas implicações, também será abordado regiões da solda e suas juntas, finalizando com as características metalográficas do aço inoxidável.

1.1.1 Soldagem *GTAW*

Segundo Machado (2015), o processo de soldagem *Gas Tungsten Arc Welding* (*GTAW*) começou a ser desenvolvido a partir de 1926 por H.M. Hobart e P.K. Devers, sendo considerados os predecessores na investigação desse processo. A empresa Meredith patenteou o processo *GTAW* com nome de *Heliarc* em 1941.

Os processos de soldagem podem ser divididos em oito principais categorias:

a) Soldagem por resistência;
b) Soldagem com oxigênio-combustível *Oxygen Fuel Welding* (*OFW*);

c) *Laser;*

d) Brasagem;

e) Soldagem por Ponto;

f) Outros processos;

g) Processos aliados;

h) Arco de solda.

Existem muitas subcategorias dentro das oito principais categorias de soldagem. A *American Welding Society* (*AWS*) destaca os 4 (quatro) processos mais comuns de arco de soldagem, conforme Figura 01.

Figura 1: Processos de Soldagem.

GTAW ou soldagem *Tungsten Inert Gas* (*TIG*) é um processo que estabelece um arco elétrico entre um eletrodo de tungstênio (BRACARENSE e HORIZONTE, 2000), não consumível, e o material a ser soldado (também pode ser chamada poça de fusão), conforme Figura 02.

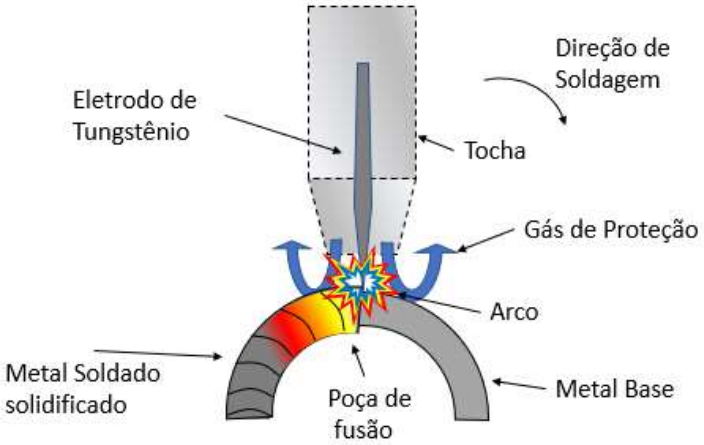

Figura 2: – Processo de soldagem *GTAW*.

Um gás inerte fornece proteção do arco elétrico formado entre o eletrodo e o material. Um metal de adição pode ser usado, entretanto não é mandatório. (PAIVA, 2014).

GTAW fornece vantagens a uma ampla variedade de industrias, de processos *high-tech*, aos processos autógenos. Processos autógenos não necessitam de metal de adição, sendo que para tubulações a espessura máxima de parede é de 0,188 pol (4,8mm). Uma dessas vantagens é controle preciso no direcionamento e fornecimento de calor. Esse é o fator que faz desse processo o preferido para unir metais de espessuras finas e para soldagem em proximidade de componentes sensíveis ao calor. Possibilita soldar materiais como alumínio, magnésio, titânio, cobre e aços inoxidáveis. Alguns metais podem ser soldados em todas as posições, dependendo da corrente e da habilidade de operação (PIGOZZO et al., 2015).

No processo um arco elétrico é estabelecido entre a ponta do eletrodo de tungstênio e o metal base, protegido por gás de proteção ionizado. O calor produzido pelo arco derrete o metal base e depois de estabelecida a poça de fusão, o eletrodo se move ao longo da junta. O arco progressivamente derrete e funde a superfície da junta.

Um eletrodo de tungstênio não consumível, mantido na tocha de soldagem, serve para a abertura do arco elétrico. Um ângulo do cone agudo na ponta do eletrodo mantém um formato de sino do arco e assim aumenta a penetração de soldagem e reduz a largura do cordão (MODENESI, 2007).

A corrente utilizada pode ser alternada ou contínua. Na corrente contínua pode-se usar polaridade direta ou inversa. Polaridade direta produz o mínimo de aquecimento no eletrodo e o máximo de aquecimento no metal base.

Gás de proteção é fornecido pela tocha para proteger o eletrodo, a poça de fusão e proteção do metal fundido da contaminação atmosférica. Argônio e Hélio ou a mistura deles são os mais comuns gases inertes utilizados no processo *GTAW*. A mistura argônio-hidrogênio pode ser usada para aplicações especiais (SCHWEDERSKY et al., 2015).

O argônio sendo um gás monoatômico e inerte é o mais utilizado devido vantagens como densidade, baixo custo (em relação ao hélio) e ajuda na abertura do arco elétrico. O hélio, sendo também um gás monoatômico, inerte e leve, transfere mais calor para a poça de fusão do que o argônio. Esse maior poder de calor é

vantajoso para união de metais de alta condutividade térmica e para soldas de alta velocidade (VILARINHO, 2009).

O fator principal que afeta a eficiência da proteção é a densidade. O argônio, que é 1,33 vezes mais denso que a densidade do ar, eficientemente, cobre a área da solda e se dissipa para a atmosfera. Para produzir a mesma eficiência a vazão do gás hélio precisaria ser de 2 a 3 vezes a vazão do argônio.

Soldagem orbital é um processo avançado usado para soldar objetos circulares e tubulações em locais como indústrias, áreas externas e navios (FERRAZ et al., 2002). O processo autógeno orbital é uma tecnologia que simplifica o processo de soldagem de objetos circulares com boas vantagens, sendo alto acabamento, baixo consumo de tempo e alta precisão, conforme Figura 03 que mostra o método diferenciado da soldagem plana normal. Neste caso é utilizada para áreas altamente sensíveis, aeroespacial, tubulação nuclear e tubos de caldeira (KROLCZYK, G.M et al., 2015).

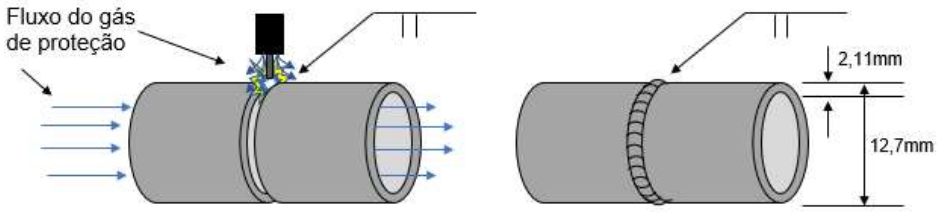

Figura 3: – Processo de soldagem orbital GTAW.

A posição de soldagem utilizada nesse estudo é a 5G descendente / ascendente que completa um ciclo de 360º, conforme Figura 04, e temperatura de pré-aquecimento igual ambiente. Em alguns casos específicos pode-se pré-aquecer o metal base, entretanto não foi utilizada neste estudo.

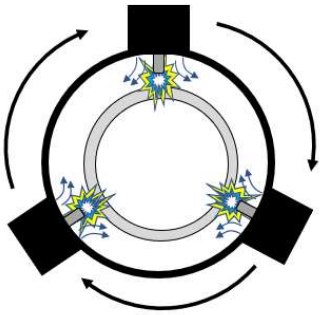

Figura 4: – Posição 5G descendente/ascendente.

Alta qualidade de solda, excelente fornecimento de calor, soldagem de diferentes tipos de metais, utilização ou não de metal de adição e grande volume de solda autógena à baixo custo, juntamente com alta limpeza da junta, são vantagens do processo orbital automático *GTAW* (NORRISH, 2006).

Como desvantagens são consideradas baixa deposição, necessidade de grande habilidade operacional para o processo manual, pouco econômico quando soldagem de tubulações de espessura de parede grossa e dificuldade em manter a proteção do gás inerte em ambientes com correntes de ar.

1.1.2 Regiões e juntas

Do processo de soldagem resulta no material 3 regiões. Essas fases são denominadas de Metal Base (MB), ZTA (Zona Termicamente Afetada) e Metal Soldado (MS), conforme Figura 05 (GASPAR, 2013).

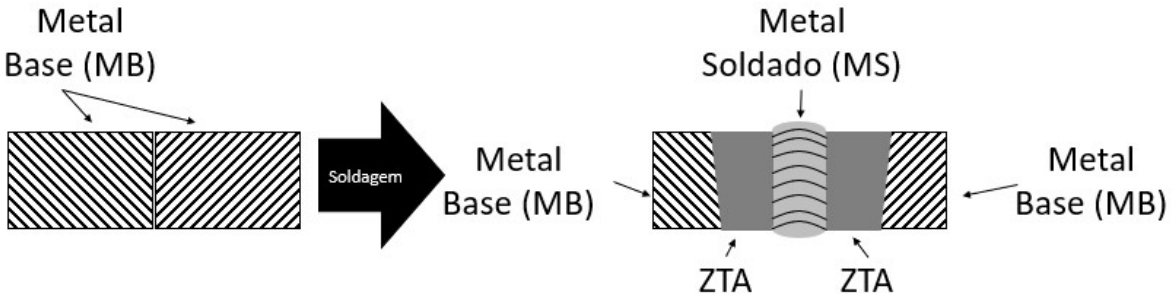

Figura 5: – 3 regiões do material soldado MB, ZTA e MS.

As cinco configurações básicas de juntas podem ser utilizadas em praticamente todos os metais, sendo que o objetivo de cada uma é minimizar o custo de soldagem mantendo os padrões de qualidade necessário de cada projeto, conforme Figura 06 (YAN et al., 2010).

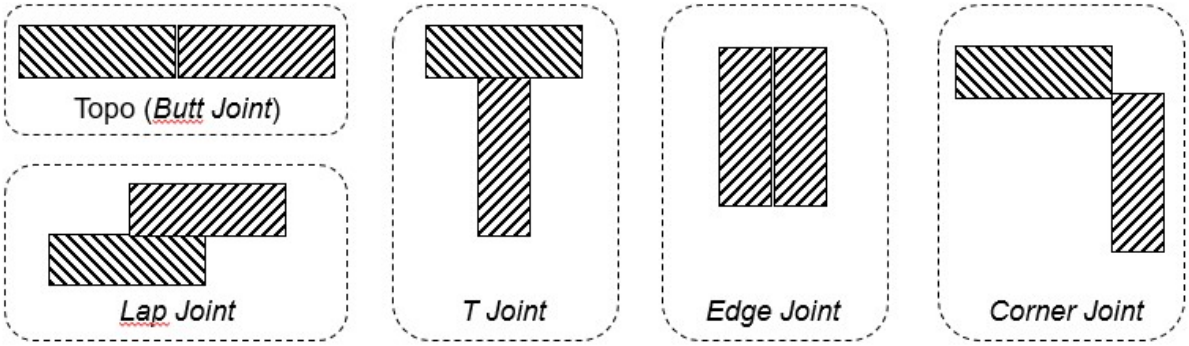

Figura 6: – Relação de Juntas.

1.1.3 Características Metalográficas do Aço Inoxidável

Para cristalizarem-se, os metais alcançam a temperatura de solidificação, arranjando-se em estrutura tridimensional ordenada, altamente organizada denominada de materiais cristalinos. Formam estruturas monocristalinas ou policristalinas.

> Algumas das propriedades importantes dos materiais sólidos dependem dos arranjos geométricos dos átomos e também das interações que existem entre os átomos ou moléculas constituintes. (CALLISTER, 2002).

Estruturas monocristalinas são inteiras, contínuas e sem rupturas, ou seja, sem contorno de grãos. São aplicadas em palhetas de turbinas de motores a reação.

Estruturas policristalinas são sólidos constituídos de infinitos cristais, ou grãos, de dimensões e orientações aleatórias. Os átomos da liga (carbono, manganês, fósforo, enxofre, sílica, cromo, níquel, molibdênio) são dissolvidos na fusão e distribuídos uniformemente entre os átomos de ferro (PASCOALI, 2008).

A análise metalográfica dos sólidos policristalinos em sistemas de ligas relaciona a microestrutura com as propriedades mecânicas, conforme Figura 07.

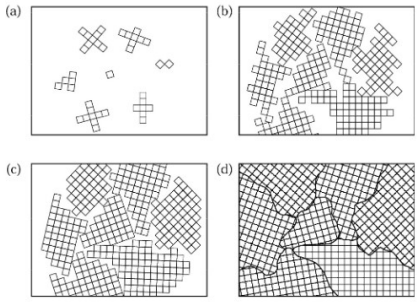

Figura 7: – Esquema do processo de solidificação de material policristalino monofásico. (a) Pequenos núcleos de cristalização, (b) crescimento dos núcleos de cristalização, (c) formação de grãos que possuem formatos irregulares, (d) estrutura dos grãos como aparecem no microscópio.
Fonte*:* Callister, 2002

O aço inoxidável austenítico *ASTM* A213 TP 316L dispõe de propriedades que o torna resistente à corrosão. Não pode ter seu grau de dureza aumentado com tratamento térmico e possui baixa permeabilidade magnética. Sua liga possui elementos como carbono, manganês, fósforo, enxofre, sílica, cromo, níquel, molibdênio e ferro.

Metal utilizado em larga escala nas indústrias alimentícias, farmacêuticas, química, petroquímicas, aeroespacial e de equipamentos hospitalares (MARSHALL, 1984).

Os aços inoxidáveis são agrupados conforme sua estrutura cristalina sendo aços inoxidáveis ferríticos, aços inoxidáveis martensíticos, aços inoxidáveis austeníticos, duplex e endurecidos por precipitação (MARTINS, 2010).

Exemplos de imagens de microestruturas cristalinas dos tipos de aços inoxidáveis, conforme Figura 08.

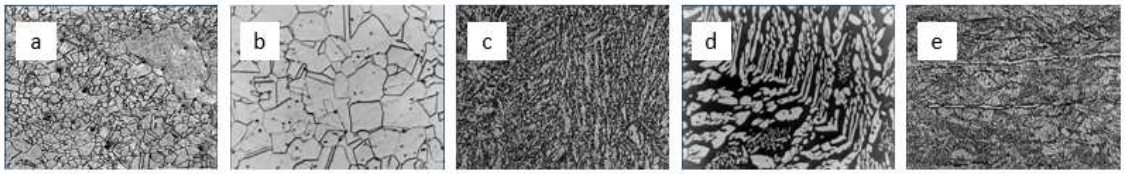

Figura 8: – (a) aço inoxidável austenítico, (b) aço inoxidável ferrítico, (c) aço inoxidável martensítico, (d) aço inoxidável duplex e (e) aço inoxidável endurecido por precipitação.
Fonte: CANALE e ROLLO, 1993

Nos aços inoxidáveis austeníticos a adição de níquel e manganês estabiliza a fase g (austenita) à temperatura ambiente. Estes aços não sofrem transformação alotrópica de fase com a mudança de temperatura e o teor de níquel, que varia entre 16 a 18%, os deixa com custos mais elevados. Ao contrário dos aços inoxidáveis ferríticos e martensíticos, os austeníticos não são magnéticos, devido à estrutura cristalina CFC, que também favorece a ductilidade, a tenacidade e a não sensibilidade à fissuração pelo hidrogênio.

Um tratamento térmico que pode ser feito em aços inxodáveis austeníticos é chamado de austenitização, que consiste no recozimento a altas temperaturas, entre 1.000^{o}C a 1.100^{o}C, seguido de resfriamento rápido ao ar ou em água. Tem o objetivo de garantir a presença da estrutura austenítica à temperatura ambiente e evitar que a fase $(FeCr)_4C$ se dissolva na austenita, se precipite e se localize nos contornos dos grãos provocando a corrosão intergranular (CHIAVERINI, 2003).

A adição de molibdênio de 2 a 3% aumenta a resistência à corrosão causada por ácido sulfúrico, ácidos orgânicos e cloretos em geral.

A química do aço inoxidável tem um efeito direto em sua soldabilidade sendo o teor de enxofre o maior fator, altera a tensão superficial do metal soldado e as características de penetração no material. Outros elementos que também afetam o metal soldado são formadores de ferrita (Cr, Mo e Si) e de austenita (Ni, C e Mn).

Equivalente de cromo e equivalente de niquel e a sua influência combinada pode ser apresentada em diagramas constitucionais empíricos levantado por Schaeffler, 1940, conforme Figura 09.

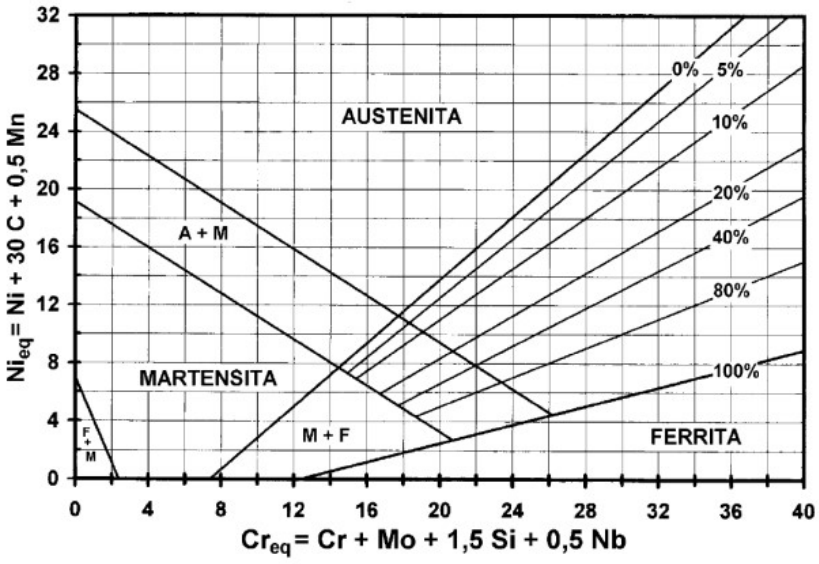

Figura 9: – Figura com diagrama de equivalência de Cr/Ni.
Fonte: Schaeffler, 1940

A ferrita δ, quando presente em teores não muito elevados, é um constituinte benéfico para o MS, pois reduz a tendência à fissuração na solidificação. Por outro lado, a quantidade de ferrita δ deve ser controlada em aplicações em que a junta soldada necessita de uma ótima resistência à corrosão, uma alta tenacidade da solda a baixas temperaturas (SCHAEFFLER, 1940).

1.2 Processamento de Imagens

Em processamento de imagens morfologia é usada para identificar e extrair descritores de imagens baseadas nas propriedades das formas e contornos. Operações morfológicas podem ser definidas através de operadores de dilatação e erosão (SOLOMON e BRECKON, 2011).

Uma operação morfológica de dilatação é realizada posicionando o centro do pixel do elemento estrutural sucessivamente em cada pixel do fundo da imagem. Se um desses pixels próximos a esse é primeiro plano, o fundo do pixel é transformado em um pixel de primeiro plano (GONZALES e WOODS, 2002).

Uma da aplicação de erosão da operação morfológica é a granulometria que é a contagem e medição dos tamanhos dos grãos ou pequenas partículas. Esse

processo pode ser alcançado por algoritmo computacional de processamento de imagens que inicialmente faz a contagem dos objetos presentes de uma imagem. Seguindo a operação de erosão é repetida usando sempre o mesmo elemento estrutural até que não exista objeto de fundo (GONZALES e WOODS, 2002).

Todo passo do processo grava o total do número de *F* objetos que foram removidos da imagem como uma função do número de *n* erosões.

A entropia ou incerteza aplicada em imagens digitais serve para medir a quantidade de informação transferida. Quanto maior o valor da entropia, mais incerteza e, portanto, mais informações. Considerando a probabilidade que um pixel de uma imagem digital ter um valor de intensidade que varia de 0 até o valor máximo *-Lmax* depois a intensidade de distribuição dos níveis *pi* pode ser conseguida pela quantidade de pixels de intensidade *i* = *ni* relacionados ao total do número de pixels da imagem – *n*.

1.3 Lógica Paraconsistente - LP

Segundo Lemes Neto e Venson (2002), diversas lógicas foram desenvolvidas tendendo a complementar a Lógica Clássica tradicional, como mostra a Figura 10. Esse esforço se deve à tentativa de atender as necessidades presentes no mundo real, que é incompleto e contraditório, por vezes imperfeito e aparentemente incoerente, o que fez com que a lógica clássica se tornasse incapaz de modelar algumas classes de situações do mundo real.

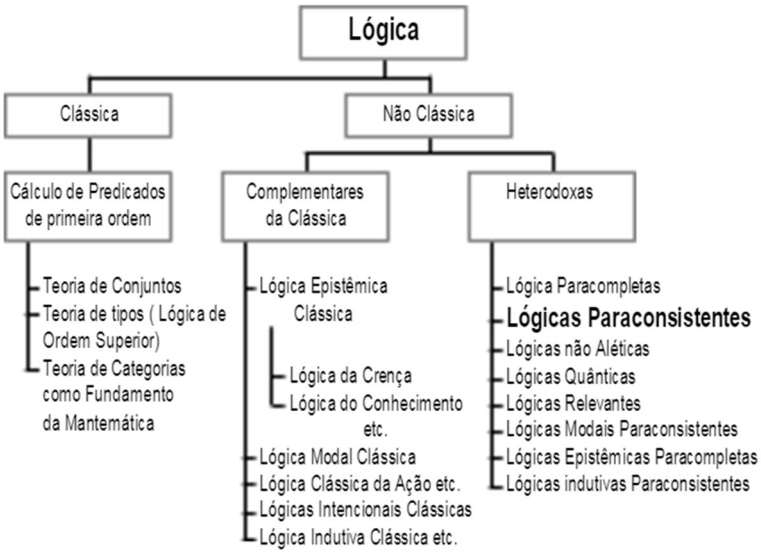

Figura 10: - Classificação de algumas Lógicas.
Fonte: Lemes Neto e Venson, 2002

No decorrrer dos últimos cinquenta anos (GENSLER, 2010) tem surgido várias opções para a lógica clássica convencional, designadas coletivamente como “lógicas não clássicas”. As lógicas não clássicas podem ser classificadas em duas grandes áreas: Lógicas não-clássicas Complementares e Lógicas Heterodoxas; dentre várias segmentações desta última, encontra-se a Lógica Paraconsistente (LP), que atende a proposta dessa pesquisa (DA SILVA FILHO; ABE; LAMBERT-TORRES, 2010).

A LP, além de considerar sinais representativos de dados originados do Conhecimento Incerto, destaca-se entre as lógicas não clássicas pelo fato de aceitar a contradição em seus fundamentos (DA COSTA; MARCONI, 1989; DA SILVA FILHO; ABE; LAMBERT-TORRES, 2010).

A LP utiliza conceitos que admitem a existência do estado inconsistente e indeterminado juntamente com o verdadeiro e falso. A negação de uma proposição inconsistente é inconsistente. A negação de uma proposição verdadeira é falsa. A negação de uma proposição falsa é verdadeira. A negação de uma proposição indeterminada é indeterminada (DA SILVA FILHO; ABE; LAMBERT-TORRES, 2010).

1.3.1 Lógica Paraconsistente Anotada - LPA

A Lógica Paraconsistente Anotada (LPA) é uma classe de Lógica Paraconsistente Evidencial que faz tratamento de sinais representados por anotações (graus), permitindo descrição e equacionamento por meio de Algoritmos. Na LPA, as fórmulas proposicionais vêm acompanhadas de anotações (DA SILVA FILHO; ABE; LAMBERT-TORRES, 2010), sendo cada anotação μ pertencente a um reticulado finito τ composto de “quatro estados extremos” (Figura 11), que atribui valores à sua correspondente fórmula proposicional P.

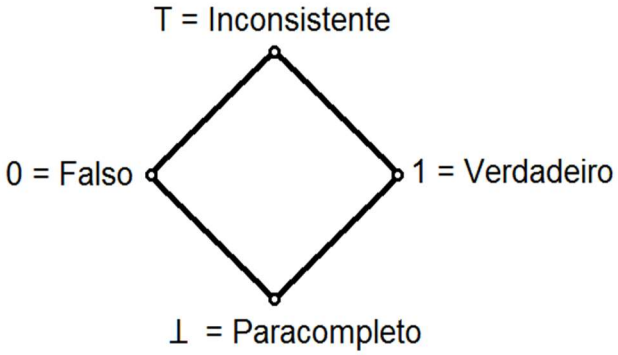

Figura 11: - Reticulado finito de quatro estados.
Fonte: Da Silva Filho; Abe; Lambert-Torres, 2010

1.3.2 Lógica Paraconsistente Anotada com anotação de dois valores- LPA2v

A LPA2v tem se apresentado eficiente quando se utiliza o conhecimento de evidências para ajudar a resolver conflitos, quando várias inferências inconsistentes ocorrem. A LPA2v é capaz de tratar contradições através da análise de evidências favoráveis (μ) e desfavoráveis (λ) a uma determinada proposição. Por meio destas análises a LPA2v pode modificar o comportamento de um sistema para que a "intensidade" de contradições diminua (DA SILVA FILHO; ABE; LAMBERT-TORRES, 2010).

1.3.3 Redes Neurais Artificiais Paraconsistentes

As Redes Neurais Artificiais Paraconsistentes se originam a partir dos conceitos da Lógica Paraconsistente e são um conjunto de células Neurais Artificiais Paraconsistentes que podem ser conectadas para modelar sistemas que requerem características similares aos predicados das Redes Neurais Artificiais, como aprendizado, reconhecimento de padrões e generalização (MARIO, 2003; DA SILVA FILHO; ABE; LAMBERT-TORRES, 2010). Em uma Rede Neural Artificial Paraconsistente a célula neural é representada por algoritmos que definem sua funcionalidade específica.

1.3.4 Célula Neural Artificial Paraconsistente de Conexão Lógica Analítica - CNAPa

A CNAPa pode receber graus de evidência de diferentes pontos em uma Rede Neural Artificial Paraconsistente e tratar as evidências resultantes desses pontos, apresentando na saída um valor resultante de uma análise paraconsistente dos pontos que convergem para esta célula (DA SILVA FILHO; ABE; LAMBERT-TORRES, 2010). A Figura 12 retrata a estrutura de uma CNAPa e o cálculo do Grau de Evidência Resultante - $\mu_{E,}$ que será utilizado neste desenvolvimento.

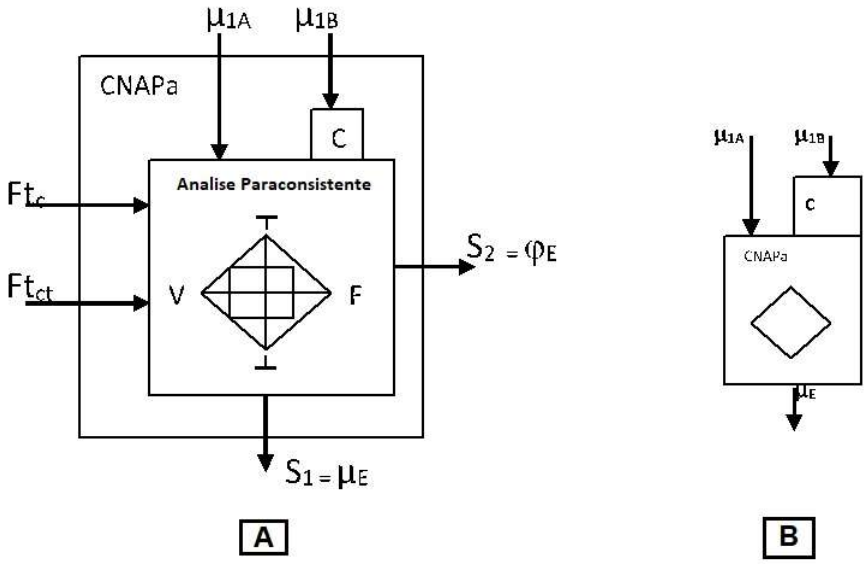

Figura 12: – (A) Célula Neural Artificial Paraconsistente de Conexão Lógica Analítica, (B) Representação simplificada da CNAPa.
Fonte: Da Silva Filho; Abe; Lambert-Torres, 2010

Com a CNAPa será possível criar uma boa ferramenta na área de Inteligência Artificial para projetar um sistema capaz de tratar uma situação real e auxiliar na tomada de decisão.

1.4 Objetivo

Através do uso de lógica Paraconsistente, identificar imagem metalográfica digital extraída através de micrografia de amostras de solda GTAW do aço inoxidável 316L, gerando padrões e submetendo amostras para sua respectiva classificação.

1.5 Objetivos Secundários

a) Investigar controle da microestrutura;
b) Reconhecer regiões antes e após o tratamento de solda em aço inoxidável 316L;
c) Utilizar a micrografia para análise das regiões de soldagem;
d) Estudar a análise morfológica de imagens digitais;
e) Pesquisar ferramentas computacionais na construção de algoritmos de morfologia e entropia;
f) Criar padrões para cada tipo de solda em sua respectiva região;

g) Utilizar a lógica Paraconsistente para reconhecer as regiões de soldagem;
h) Modelar uma Rede Neural Artificial Paraconsistente para caracterizar os tipos de soldas e realizar a classificação da amostra;

1.6 Justificativa e Relevância do Tema

Importante técnica para extrair imagens digitais de amostras metalográficas, processá-las e analisá-las, permite obter dados relacionados a características estruturais facilitando a interpretação automática das características por aplicações computacionais (BARNEA et al., 1972).

Visto que em tempos atuais os processos automáticos estão cada vez mais ganhando espaço no cotidiano profissional, então utilizar esse método de reconhecimento deixa a inteligência orgânica mais disponível para assuntos e temas não operacionais e repetitivos, contribuindo assim para o crescimento intelectual e diversidade do tema em questão.

1.7 Organização da dissertação

Esta dissertação está organizada da seguinte forma:

Na apresentação é introduzido um breve histórico e destacada a importância da metalografia digital assim como o uso de lógica e inteligência artificial. No capítulo 1 são apresentados os objetivos do trabalho, a justificativa e relevância do tema. No capítulo 2 é feita a fundamentação de materiais e métodos aplicados para obtenção de amostras de solda e modelo de redes neurais paraconsistentes.

No capítulo 3 são apresentados os resultados. O capítulo 4 apresenta as discussões iniciando-se pelos procedimentos para obtenção do das amostras e o uso e escolha da lógica paraconsistente anotada. Estes resultados são os valores obtidos através de um procedimento comparativo das imagens digitais de padrões e classificação com os índices LPA2v.

No capítulo 5 são apresentadas as conclusões e sugestões para trabalhos futuros. No capítulo 6 é apresentada a versão compacta. Por último as referências e apêndices.

2 MATERIAIS E MÉTODOS

Nessa pesquisa o ambiente de soldagem necessita estar controlado. O oxigênio causa oxidação no material. Sujeiras no material, como hidrocarbonetos e partículas contribuem para falhas na soldagem.

Para a soldagem GTAW orbital autógena os parâmetros a serem controlados são: o grau de pureza do gás de proteção, a vazão de purga, a velocidade do gás, pressão e o período de enchimento (troca) do tubo com o gás de proteção.

A exaustão do gás de proteção ID é outro fator a se considerar sendo necessário um restritor na saída para ajudar a controlar a pressão interna. O excesso de pressão interna pode causar uma expansão da poça de fusão durante a solda comprometendo e podendo causar contaminação da poça do material soldado.

Foram consultados códigos e as seguintes normas para o desenvolvimento desse trabalho:

a) ASME BPVC section IX.
b) ASME B31.3 Categoria D “Normal Fluid Service”
c) ASME B31.1 Nonboiler External Piping & Joint System (NBEP)
d) SEMI F78 e F81
e) ASME BPE

2.1 Preparação das Amostras de Solda

Os métodos utilizados nessa pesquisa, para o material a ser soldado, pertencente a classificação P-8 grupo 1, ASTM A213 TP 316L possuem diâmetro externo 12,7mm e espessura 2,11mm. Limitados a pressão de -15psig/-1bar a 3750psig/258,6bar.

“P-numbers” são associados a metais base para reduzir o número de procedimentos de soldas requeridos.

A configuração do tipo junta utilizada nesse trabalho é o tipo de topo (*butt joint*), conforme Figura 13.

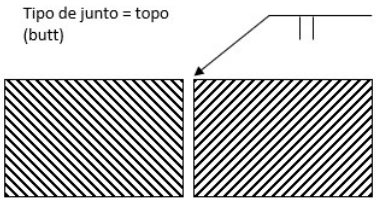

Figura 13: – Junta de topo utilizada nesse trabalho.

Para extrair a melhor condição de soldagem o acabamento, da junta foi feito através de faceamento mecânico. O ideal para a preparação da junta seria utilizar torno, entretanto, para esse estudo foi utilizado uma faceadeira modelo TF24 do catálogo da fabricante Swagelok. Para esse processo o tubo foi cortado com serra manual e posterior utilizada a ferramenta de faceamento, conforme Figura 14. Posterior a limpeza da junta foi feita com álcool isopropílico para evitar resíduos de graxas, óleos e sujidades

Figura 14: – Método de acabamento faceamento da junta.
Fonte: Catálogo Swagelok

Os equipamentos utilizados no processo de soldagem orbital GTAW nesse trabalho que foram essenciais, são:

a) Cilindro com gás de proteção
b) Fonte de solda
c) Tocha de solda
d) Bloco de fixação

Fonte de solda, converte alta tensão elétrica e baixa corrente alternada em baixa tensão elétrica e alta corrente contínua. O modelo utilizado nesse trabalho foi o M200, sistema de solda da Swagelok, conforme Figura 15.

Figura 15: – Fonte de solda modelo M200 Swagelok.
Fonte: Catálogo Swagelok

Tocha segura o eletrodo e está conectado à fonte de solda por um cabo condutivo. Cabeça de solda modelo 5H (usado para diâmetros externos de solda entre 1/8” a 5/8”). A cabeça de soldagem é aonde está localizada a tocha automática que realiza a soldagem GTAW. Pertencem a esse conjunto o bloco de fixação e os “collets” (CWS-5UCI-08), conforme Figura 16.

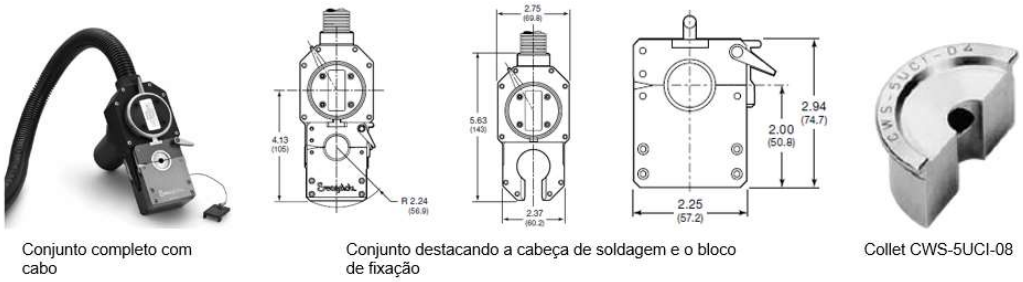

Figura 16: – Conjunto para efetuar a soldagem Swagelok.
Fonte: Catálogo Swagelok

Eletrodo, conduz o arco da tocha para o metal base. O eletrodo utilizado foi o de tungstênio que possui 2% de concentração desse material. Suas características dimensionais possuem 0,040” ou 1,0mm de diâmetro e 0,555” ou 11,4mm de comprimento, utilizado o modelo CWS-C.040.555-P da fabricante Swagelok, conforme Figura 17.

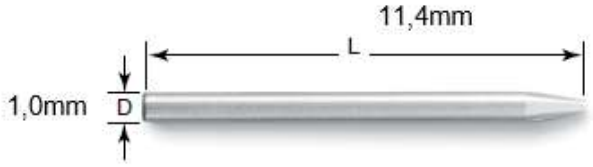

Figura 17: – Eletrodo de Tungstênio CWS-C-040-555-P.
Fonte: Catálogo Swagelok

Para esse estudo não será utilizado nenhum tipo de adição de material.

Painel de purga do gás, fornece o gás inerte para o interior do tubo. A cabeça de solda fornece o gás inerte para o exterior do tubo. É aplicado para se manter um

fluxo constante e preciso de gás de purga, manter a solda orbital livre de impurezas. O painel utilizado nesse trabalho se mostra idêntico a Figura 18.

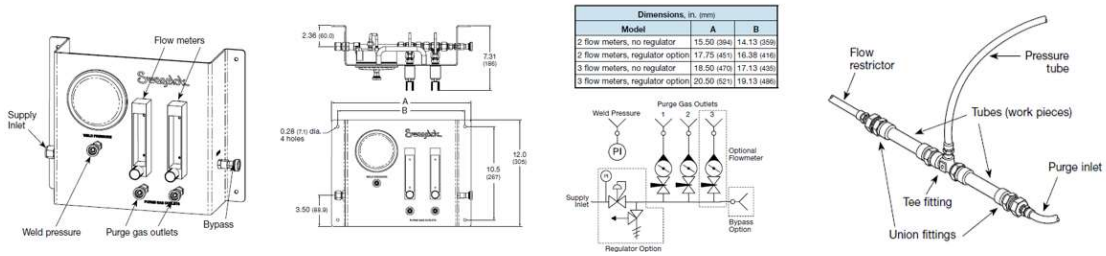

Figura 18: – Painel de purga ID.
Fonte: Catálogo Swagelok

A temperatura que o experimento desse trabalho foi realizado foi a ambiente, variando entre 20ºC a 23ºC, um limite para valores de temperatura é que as propriedades se alteram quando abaixo de 10ºC.

Gás de proteção, o gás protege o eletrodo e a poça de fusão da contaminação atmosférica. O gás de proteção ou gás de purga utilizado nesse trabalho é o argônio, alta pureza e baixo teor de contaminantes. Entra na categoria de gases especiais.

Os gases comerciais são fornecidos com determinados padrões, entre eles o grau de pureza, FISPQ, número ONU, número de risco e se é inflamável e tóxico.

O grau de pureza ou teor de pureza é comercializado com uma numeração ao lado do nome do gás. Nome do gás e uma numeração X.Y, onde X representa o número de “noves” da pureza e o Y representa o último dígito de pureza, de 0 a 8. Esses graus são encontrados conforme Tabela 01.

Tabela 1: Classificação do grau de pureza de gases comercializados

GRAU	Pureza Mínima	Impurezas (ppm)						Tipo de Conexão
		THC	O2	H2O	N2	CO2	CO	
6.0	99,9999%	<0,1	<0,2	<1	<1	-	-	ABNT 245-1
5.0 Analítico	99,999%	<0,5	<1	<2	<3	<1	<1	ABNT 245-1
5.0 Plasma	99,999%	<0,5	<1	<2	<3	-	-	ABNT 245-1
4.8	99,998%	-	<3	<3	<10	-	-	ABNT 245-1

Nesse trabalho utilizamos o Argônio 5.0, faz parte da categoria de gases especiais e com grau de pureza 99,999%, FISPQ P-4563, número ONU 1006, número de risco 1, gás não inflamável, não tóxico, incolor, inodoro e não reativo. Suas características físico-químicas seguem conforme Tabela 02.

Tabela 2: Propriedades físico-químicas do Argônio

Gás	Massa Molecular g *mol-1	Constante R kgf*m/kg*K	Densidade relativa a 21ºC	Temperatura Crítica ºC	Pressão Crítica kgf/cm² abs	Volume Específico m³/kg
Argônio	39,944	21,23	1,378	-122,5	49,61	0,61

Os gases são armazenados em forma de cilindros, ajudando no manuseio e transporte. Para o grau 5.0 podem ser encontrados de acordo com a Tabela 03.

Tabela 3: Disponibilidade de Cilindros de grau 5.0

Tipo de Cilindro	Conteúdo m³	Pressão kgf/cm²	Peso Bruto kg
T	10	200	84,4
Q	3,3	150	34,4
G	1	150	13,6
XL-45	122	10	320,0

Nesse trabalho foi utilizado o cilindro do tipo T, para alta pressão, fabricado em aço, conforme Figura 19.

Figura 19: – Cor que representa o gás e modelo.
Fonte: Catálogo White Martins

Foi utilizado o método de solda *GTAW*, usualmente conhecido como processo de soldagem TIG. As soldas foram feitas sem adição de material. Posição 5G descendente/ascendente e sem utilização de fluxo. Foram analisadas as 3 regiões do material soldado MB, ZTA e MS, conforme Figura 05.

A aparência final do cordão de solda não pode apresentar concavidade e nem convexidade, apresentando penetração total, conforme Figura 20.

Tubo de aço inoxidável soldado pelo processo GTAW orbital

Penetração total do cordão de solda para o diâmetro interno do tubo

Figura 20: – Soldagem orbital e penetração total.

Especificações do processo de soldagem sem variação para o experimento:

a) ASME AS-213
b) Grau/classe 316L
c) P Number 8 com P Number 8.
d) G Number 1 com G Number 1.
e) Diâmetro do tubo 12,7mm.
f) Espessura do tubo 2,11mm.
g) Sem metal de adição.
h) Sem fluxo.
i) Posição 5G descendente/ascendente ↓↑.
j) Temperatura de pré-aquecimento 23ºC, temperatura ambiente.
k) Gás de proteção OD: A5.32 – SG-A.
l) Composição do gás de proteção 99,999% Argônio.
m) Vazão padrão: 11,8 l/min (25ft3/h).
n) Gás de proteção na purga ID: A5.32 – SG-A.
o) Tempo de purga: 20 segundos.
p) Tipo de eletrodo: Tungstênio ASME SFA-5-12 – EWCe-2 – ϕ 1,2mm.
q) Eletrodo tipo simples (somente um) de camada simples.
r) Tipo de passe: retilíneo.
s) Comprimento do eletrodo: 23,54mm
t) Distância entre material base e eletrodo: 1,40mm.
u) Acabamento do metal base: Usinado (faceado) e limpeza com álcool.

As variáveis da fonte no processo de soldagem GTAW, corrente elétrica, velocidade de avanço e tensão elétrica. A corrente elétrica é a corrente medida entre o eletrodo de tungstênio e o material a ser soldado. A corrente é a responsável pela penetração de solda.

A velocidade de avanço é a velocidade que o eletrodo se move pelo material durante a soldagem. A velocidade de avanço afeta tanto a largura quanto a penetração de soldagem. Afeta a largura mais que a penetração. Aumentando a velocidade de soldagem reduz a largura do cordão de solda.

Tensão elétrica é a queda de tensão medida através do arco do eletrodo de tungstênio. A tensão elétrica é afetada pela distância entre o eletrodo e o material, esse “gap” afeta diretamente a largura da poça de fusão.

Experimentos em processo de soldagem com parâmetros de soldagem original, tratamento de austenitização com resfriamento lento e soldagem sobre solda (reparo).

2.2 Metodologia Utilizada para Processamento de Amostras

A amostra caracterizada como original utilizou parâmetros de soldagem padrões, ou seja, solda aprovada para uso em montagens de tubulações para utilização com gases especiais, conforme Figura 21.

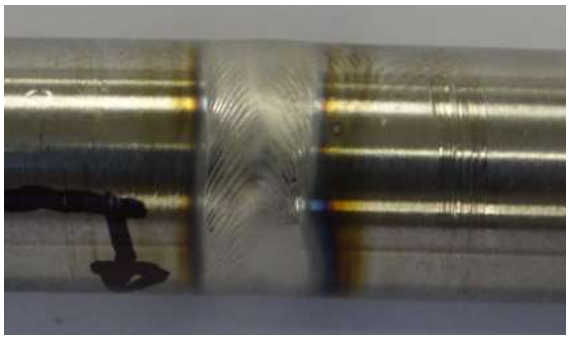

Figura 21: – Amostra da solda original.

Os parâmetros da Solda Original foram programados na fonte de solda conforme tabela 04.

Tabela 4: Parâmetros de Soldagem Original

		Níveis			
Parâmetros	Unidade	01	02	03	04
Corrente Alta	A	97,6	95,3	94,2	90,5
Corrente Baixa	A	34,9	34,9	34,9	34,9
Tensão	V	8,7	8,7	8,7	8,7
Tempo de Solda	segundos	6,5	6,5	6,5	6,5
Tempo de subida	segundos	0	0	0	0
Taxa de Pulso	Hz	2	2	2	2
Largura Corrente Alta	%	39	39	39	39
Velocidade Corrente Alta	rpm	2,64	2,64	2,64	2,64
Velocidade Corrente Baixa	rpm	2,64	2,64	2,64	2,64
Ângulo de começo	°	0	103	206	309
Corrente média	A	59,4	57,5	55,6	53,7
Tempo de pré-purga	segundos	20	20	20	20
tempo de pós-purga	segundos	20	20	20	20
Vazão do gás de proteção	std ft^3/h	25	25	25	25
Vazão esperada interna tubo	std ft^3/h	25	25	25	25
Vazão mínima interna tubo	std ft^3/h	15	15	15	15
Pressão interna de purga	in. H2O	1300	1300	1300	1300

A amostra caracterizada como tratamento de austenitização com resfriamento lento foi feita com os padrões de soldagem original e depois colocada num forno a 1050°C durante 1 hora. Em seguida o forno foi desligado e a amostra ficou no lado de dentro. A temperatura interna do forno demorou 8 horas para atingir a temperatura ambiente, conforme Figura 22.

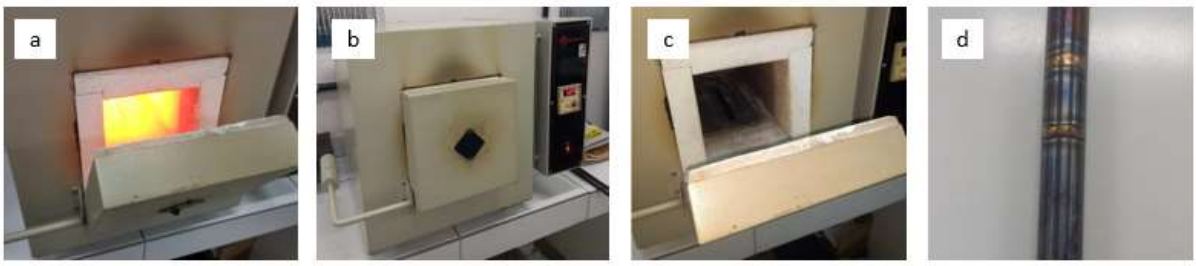

Figura 22: – a) Temperatura do forno em 1050°C durante 1 hora. b) Resfriamento lento dentro do forno durante 8 horas até atingir temperatura ambiente. c) Abertura do forno para retirada da amostra. d) Aparência final após o processo de resfriamento lento.

A amostra caracterizada como soldagem sobre solda (reparo) foi feita primeiramente com os padrões de soldagem original e em seguida uma nova passagem com parâmetros aumentados em 30%. Aparência da solda conforme Figura 23.

Figura 23: – Solda sobre solda (reparo).

Parâmetros de soldagem de reparo, onde os parâmetros foram alterados (aumentados), são apresentados conforme tabela 05.

Tabela 5: Parâmetros de Soldagem Reparo

		Níveis			
Parâmetros	Unidade	01	02	03	04
Corrente Alta	A	126,1	119,9	113,5	107,4
Corrente Baixa	A	46,4	46,4	46,4	46,4
Tensão	V	11,3	11,3	11,3	11,3
Tempo de Solda	segundos	6,5	6,5	6,5	6,5
Tempo de subida	segundos	0	0	0	0
Taxa de Pulso	Hz	2	2	2	2
Largura Corrente Alta	%	45	45	45	45
Velocidade Corrente Alta	rpm	2,64	2,64	2,64	2,64
Velocidade Corrente Baixa	rpm	2,64	2,64	2,64	2,64
Ângulo de começo	°	0	103	206	309
Corrente média	A	82,3	79,5	76,6	73,9
Tempo de pré-purga	segundos	20	20	20	20
tempo de pós-purga	segundos	20	20	20	20
Vazão do gás de proteção	std ft^3/h	25	25	25	25
Vazão esperada interna tubo	std ft^3/h	25	25	25	25
Vazão mínima interna tubo	std ft^3/h	15	15	15	15
Pressão interna de purga	in. H2O	1300	1300	1300	1300

Para a análise metalográfica e a verificação das estruturas formadas em cada região, os corpos de prova foram preparados de acordo com a NBR 11094, 1990. Esta preparação consiste em lixamento com a sequência de lixas: 60,180, 240, 320, 400 e 600 seguido de um polimento com pasta de diamante.

Para o processo de micrografia no corpo de prova as amostras foram cortadas na seção transversal da solda. Feito o embutimento e seguido de polimento. Ataque químico com vilela e posterior visualização em microscópio, conforme Figura 24.

Figura 24: – Preparação de amostras para o processo de micrografia.

As imagens metalográficas de solda analisadas foram padronizadas com o tamanho de 120 x 80 pixels para a análise morfológica e para as características da entropia.

2.3 Rede Neural Artificial Paraconsistente

A Célula Neural Artificial Paraconsistente da conexão lógica analítica (CNAPa) é um grupo de algoritmos interconectados e pode receber graus de evidência de diferentes pontos de uma Rede Neural Artificial Paraconsistente. Trata o resultado da evidência desses pontos apresentando numa saída o valor resultante da análise paraconsistente dos pontos que convergem para essa célula.

A caracterização das regiões MB, ZTA e MS para os tipos de solda Original, Austenitização e Reparo será feita a partir de Células Neurais Artificiais Paraconsistentes de Conexão Lógica Analítica - CNAPa, que receberão evidências das análises morfológica e da entropia da imagem digital de metalografia de soldas.

Neste trabalho, a CNAPa será utilizada para efetuar os tratamentos dos sinais obtidos pelas análises metalográfica e morfológica das soldas e a classificação. O grau de evidência de entrada 1 será μ_{1A}, com $0 \leq \mu_{1A} \leq 1$, o segundo valor do grau de evidência de entrada 2 será μ_{1B}, com $0 \leq \mu_{1B} \leq 1$, em seguida transforma-se o grau de evidência 2 em grau de evidência desfavorável, isto é, $\lambda_2 = 1 - \mu_{1B}$, com $0 \leq \lambda_2 \leq 1$. Neste caso o Fator de tolerância à Certeza – F_{tc} será ajustado em 1, e assim o Grau de Evidência Resultante - μ_E na saída é obtido a partir da equação $\mu_E = [(\mu_{1A} - \lambda_2) + 1]/2$. Quando o F_{tc} é ajustado em 0, μ_E sofre restrições de modo que não pode ser

considerado como evidência resultante das evidências de entrada (MARIO, et al., 2018).

2.3.1 Geração do padrão por região e tipo

Ao iniciar o processo da concepção do padrão de um tipo de solda, se faz necessário o usuário informar onde se encontra a base de dados das imagens.

Em seguida é oferecido um menu para que se especifique o tipo de solda que será estudada.

Finalizando as informações iniciais, se faz necessário informar a quantidade de amostra do referido tipo escolhido, que serão utilizados para gerar o padrão da solda em estudo.

Analisando amostra por amostra em uma estrutura de repetição de acordo com a quantidade de amostra fornecida, como mostra a Figura 25, com a identificação do nome de cada amostra respectivamente.

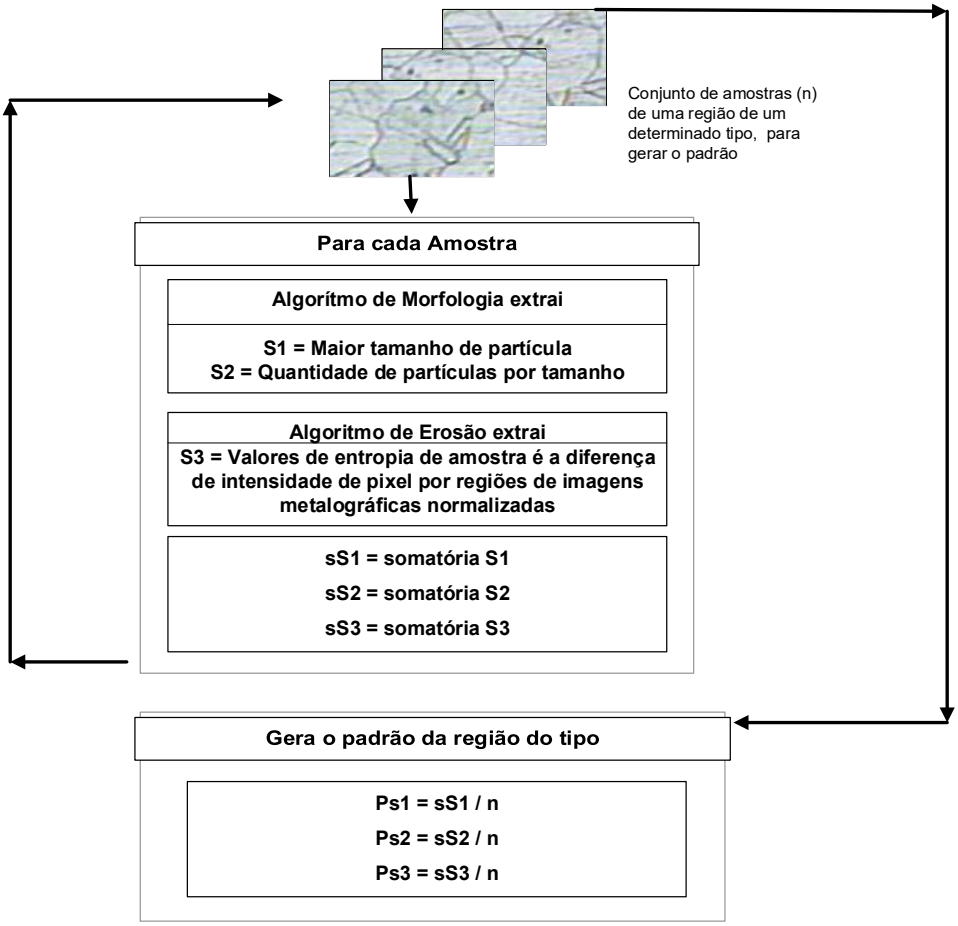

Figura 25: – Geração do padrão de uma região de solda de um tipo.

A leitura da imagem original e com base nela, aplica-se o algoritmo de morfologia buscando a distribuição cumulativa do tamanho de partícula, o maior tamanho de partícula e a quantidade de partículas por tamanho.

Aplica-se também o algoritmo de erosão onde é retirada as partículas que compõem a solda num processo de estudo de pixel, desta forma, caracterizando a entropia em tons de cinza.

Concluído o laço das amostras, é calculado o valor médio desse estudo nos itens, maior tamanho de partícula, quantidade de tamanhos e entropia, gerando assim o padrão de cada solda em sua respectiva região (Código completo – APÊNDICE A).

2.3.2 Metodologia para gerar classificação de uma amostra

O programa da classificação é composto por cinco etapas:

Primeira etapa, Figura 26, inicialmente é informado o caminho onde se encontra a amostra e o nome do arquivo que contém a imagem a ser estudada.

Em seguida, a imagem é tratada, isto é, aplica-se o algoritmo de morfologia extraindo o maior tamanho de partícula e a quantidade de partículas por tamanho, acompanhado pelo algoritmo de erosão caracterizando a entropia em tons de cinza.

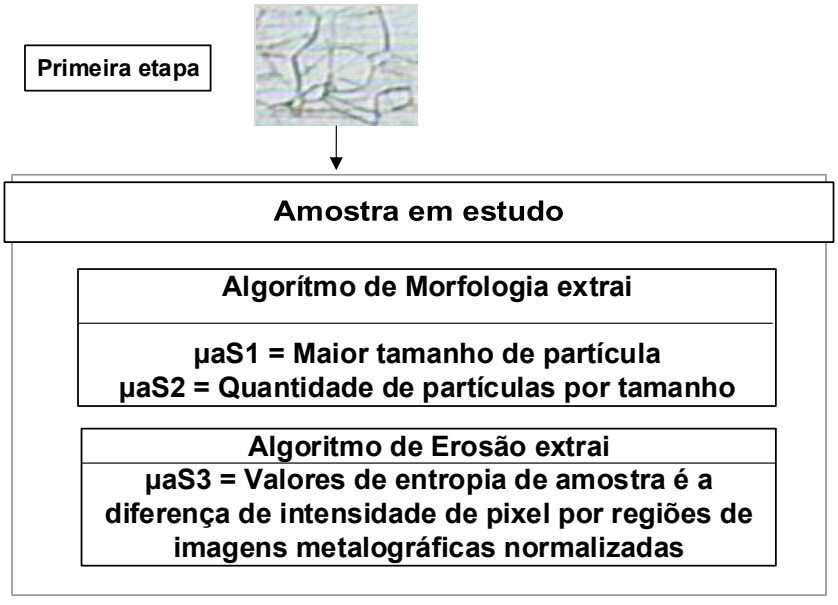

Figura 26: – Primeira etapa: Identificação da amostra.

Na segunda etapa é feita a leitura dos padrões, isto é, para cada tipo de solda, tem-se o padrão de cada região, como mostra a Figura 27.

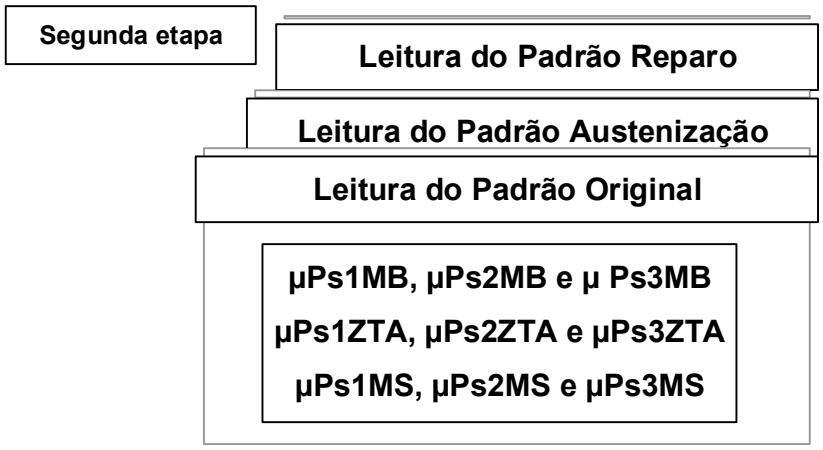

Figura 27: – Segunda etapa: Leitura dos padrões.

Com base nesses dados extraídos da primeira e segunda etapa, inicia-se a terceira etapa enviando os dados para as Células Neurais Artificiais Parconsistentes de Conexão Lógica Analítica – CNAPa, conforme pode ser observado na Figura 28.

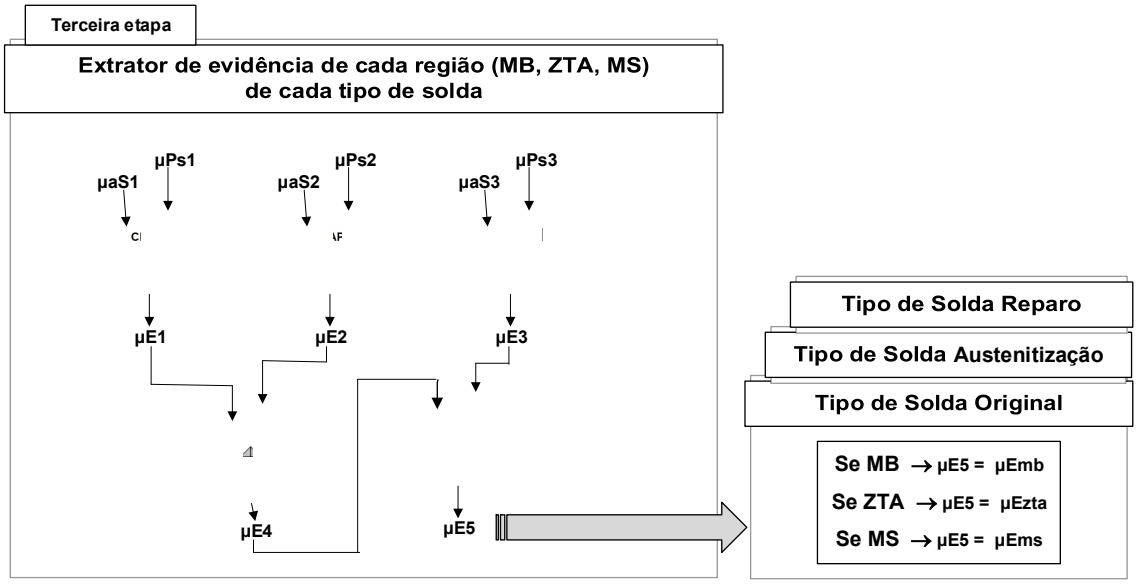

Figura 28: – Terceira etapa: Evidência de cada região para cada tipo de solda.

A primeira célula efetua calculo morfológicos, tomando o valor da amostra (μ_{aS1}) e do padrão da região (μ_{Ps1}) e através da expressão em *RNPC(1,j)* define a evidência (μ_{E1}) por dimensão.

A segunda célula ainda faz cálculos de características morfológicas, assumindo o valor da amostra (μ_{aS2}) e do padrão da região (μ_{Ps2}) e através da expressão em *RNPC(2,j)* resultando na evidência (μ_{E2}) que expressa a quantidade de dimensão.

A terceira célula executa o cálculo da entropia, para isso, toma o valor da amostra (μ_{aS3}) e do padrão da região (μ_{Ps3}) e através da expressão em *RNPC(3,j)* resultando na evidência (μ_{E3}) que representa a entropia.

A quarta célula toma os valores das evidências (μ_{E1} e μ_{E2}) e pela expressão *RNPC(4,j)* extrai a evidência morfológica (μ_{E4}).

Finalmente a quinta célula utilizando os valores (μ_{E3} e μ_{E4}) através da expressão *RNPC(5,j)*, obtém-se o grau de evidência da região do tipo de solda μ_{E5}.

Esse processamento segue o algoritmo descrito conforme figura 29.

Para j variando de 1 até 9

$$RNPC(1,J) = \frac{1}{e^{|P(1,j)\ \text{-}Media\ Particulas\ Dimensão|}}$$ %calcula morfologia por dimensão

$$RNPC(2,j) = \frac{1}{e^{|p(2,J)-Quantidade\ dimensões|}}$$ %calcula morfologia por quant.dimensões

$$RNPC(3,j) = \frac{1}{e^{|P(3,j)-Entropi\ |}}$$ %calcula entropia

$$RNPC(4,j) = \frac{RNPC(2,j) - [1 - RPNC(1,j)\ ] + 1}{2}$$ %calcula evidência morfológica

$$RNPC(5,j) = \frac{RNPC(4,j) - [1 - RNPC(3,j)\ ] + 1}{2}$$ %calcula evidência região

Fim

Figura 29: – Cálculo das camadas da CNAPa.

Com base nesses cálculos para cada região do tipo de solda, inicia-se a quarta etapa que irá extrair a evidência parcial por tipo de solda, como pode ser observado na Figura 30 a seguir.

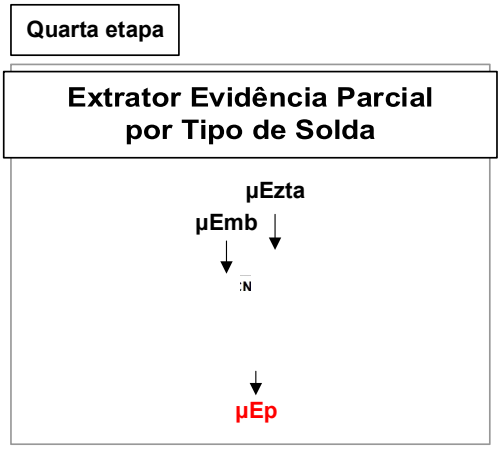

Figura 30: – Quarta etapa: Evidência parcial para cada tipo de solda.

Nessa etapa utiliza-se a evidência μ_{E5} para a região MB de um tipo de solda caracterizando assim μ_{Emb} e também a evidência μ_{E5} para a região ZT do mesmo tipo de solda gerando o μ_{Ezta}.

Através da sentença, $\mu_{Ep} = \frac{\mu_{Emb} - (1 - \mu_{Ezta}) + 1}{2}$. Calcula-se a evidência parcial para cada tipo de solda (μ_{Ep}).

Então inicia-se a quinta etapa do processo, para tanto, utiliza-se o valor da etapa anterior μ_{Ep} e a evidência μ_{E5} para a região MS do mesmo tipo de solda gerando o μ_{Ems}. De posse desses valores, por meio da sentença:

$$\mu_{Ef} = \frac{\mu_{Ep} - (1 - \mu_{Ems}) + 1}{2}$$

Calcula-se o extrator de evidência final do tipo de solda (original, austenitização e reparo), como mostra a Figura 31.

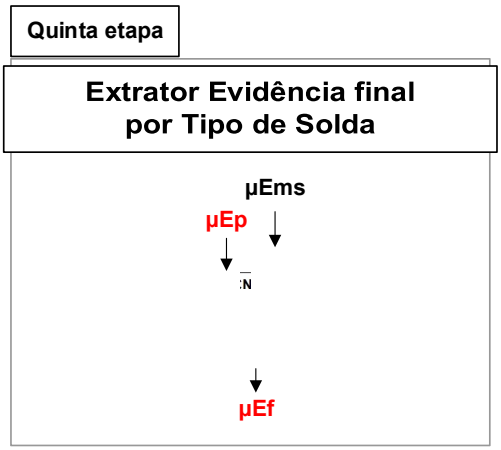

Figura 31: – Quinta etapa: Extrator de evidência final do tipo de solda.

Com base nos cálculos efetuados então é criada a saída da rede paraconsistente, apoiada no algoritmo através de um processo decisório apresentando uma saída do valor resultante da análise paraconsistente que representa a classificação da amostra em estudo, conforme figura 32.

```
%SAÍDA DA REDE PARACONSISTENTE - SISTEMA ESPECIALISTA
Se [ evf(1,1) > evf(2,1) ] e [ evf(1,1) > evf(3,1) ] então
  Exiba "Solda do tipo Original com evidência = evf(1,1)"
Senão Se [ evf(2,1) > evf(1,1) ] e [ evf(2,1) > evf(3,1) ] então
  Exiba "Solda do tipo Austenitização com evidência = evf(2,1)"
Senão Se [ evf(3,1) > evf(1,1) ] e [ evf(3,1) > evf(2,1) ] então
  Exiba "Solda do tipo Reparo com evidência = evf(3,1)"
Senão Se [ evf(1,1) = evf(2,1) ] e [ evf(1,1) > evf(3,1) ] então
  Exiba "Solda do tipo Original ou Austenitização com
  evidência=evf(1,1)"
Senão Se [ evf(1,1) = evf(3,1) ] e [ evf(1,1) > evf(2,1) ] então
  Exiba "Solda do tipo Original ou Reparo com evidência = evf(1,1)"
Senão Se [ evf(3,1) = evf(2,1) ] e [ evf(3,1) > evf(1,1) ] então
  Exiba "Solda do tipo Austenitização ou Reparo com
  evidência= evf(2,1)"
Senão
  Exiba "Solda de tipo indeterminado"
Fim
```

Figura 32: – Saída Rede Paraconsistente Gerando Classificação da Amostra.

Com as seguintes possiblidades de resultados:

Solda do tipo Original,

Solda do tipo Austenitização,

Solda do tipo Reparo,

Soda do tipo Original ou Austenitização,

Solda do tipo Original ou Reparo,

Solda do tipo Austenitização ou Reparo,

Solda de tipo indeterminado.

Cabe destacar que, nos testes realizados através das amostras colhidas que serão apresentados no capítulo 3 Resultados será possível observar que foi obtido apenas uma das três primeiras opções (Código completo – APÊNDICE B).

3 RESULTADOS

Apresenta-se nesse capítulo os resultados das análises feitas nas amostras. Cabe salientar que as amostras utilizadas para gerar os padrões são distintas em relação as amostras que serão futuramente classificadas.

A análise metalográfica gerou um total de 87 amostras que foram separadas da seguinte forma: 26 amostras para gerar o padrão e 61 amostras para gerar a classificação, como pode ser observado na Figura 33.

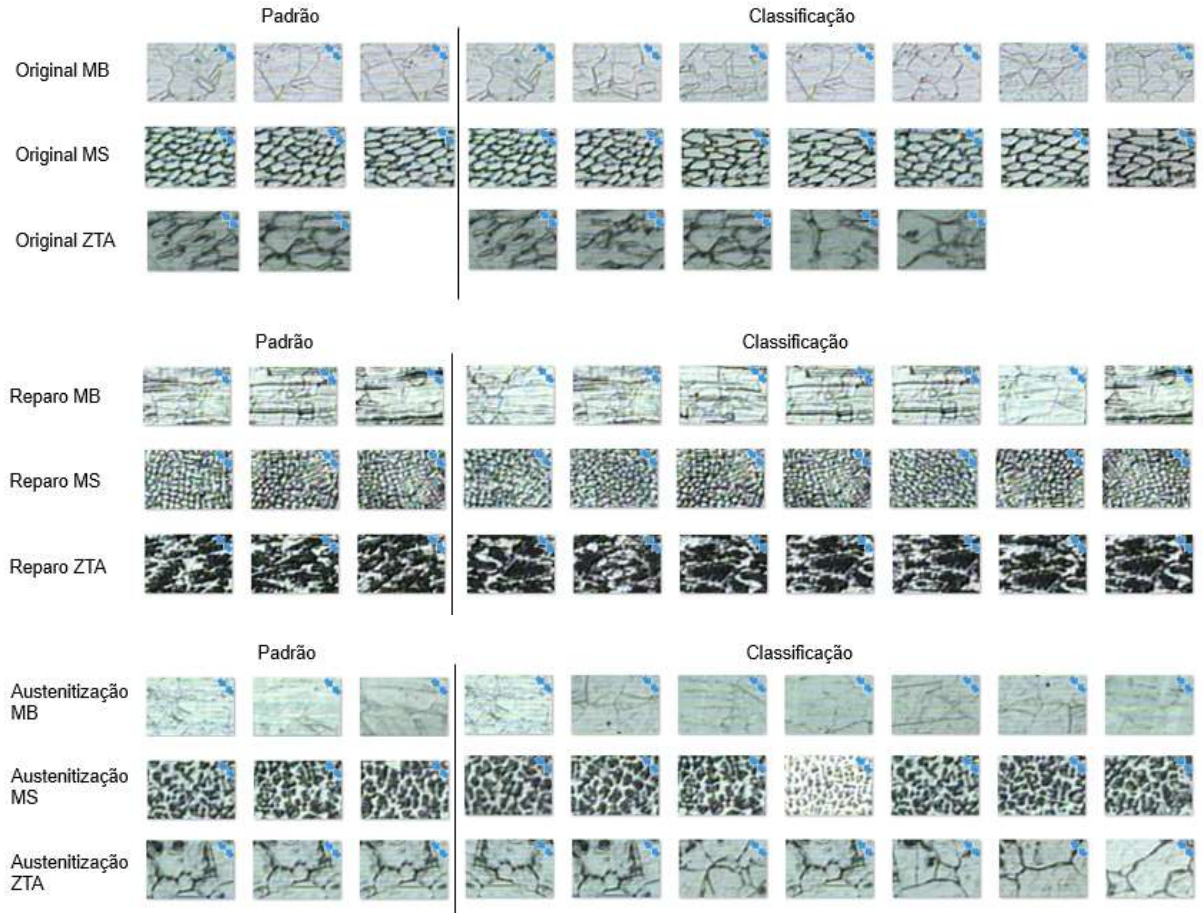

Figura 33: – Geração das amostras da análise metalográfica.

Nos resultados obtidos um dos pontos a ser discutido é a visualização gráfica da operação de erosão que pode ser vista nos dois *scripts* (padrão e classificação), onde é fornecida a imagem original e a sua erosão. Na Figura 34 a seguir foi utilizada a amostra Original_ZTA_05.

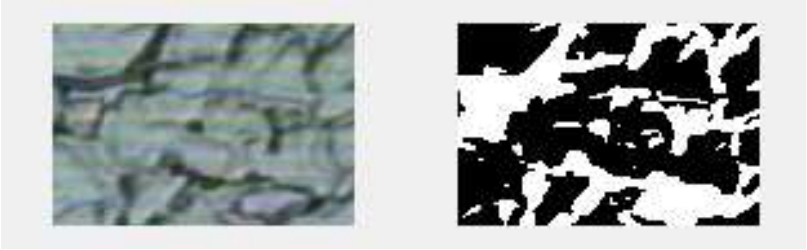

Figura 34: – Imagem Original e sua erosão.

Outro gráfico também é disponibilizado nos dois *scripts* que retrata a quantidade de partículas por tamanho, através de seus pontos discretos e sua respectiva derivada, como mostra a Figura 35.

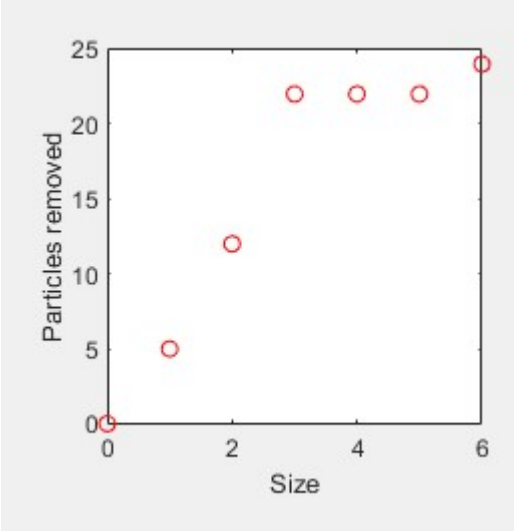

Figura 35: – Quantidade de partículas por tamanho.

Executando o *script* padrão para cada tipo de solda proposto no menu do programa ficou consagrado os seguintes padrões, como pode ser observado na tabela 06 a seguir.

Nessa tabela é possível observar cada tipo de solda, as amostras utilizadas para gerar cada respectivo padrão e também o resultado final de cada processamento.

Cabe ainda destacar que foi criada uma planilha para armazenar esse processamento. Esse procedimento conecta os resultados obtidos do processamento do padrão ao *script* da classificação.

Tabela 6: Processamento de cada tipo de solda gerando o respectivo padrão

Original MB	Padrão			
Amostra	Amostra 2	Amostra 7	Amostra 9	**Final**
Maior tamanho de partícula	13,0000	11,0000	17,0000	13,6667
Quantidade de partículas por tamanho	7,8890	4,7780	8,0000	6,8890
Entropia A_cinza	0,9590	0,9570	0,9530	0,9563
Original ZTA	Padrão			
Amostra	Amostra 2	Amostra 3		**Final**
Maior tamanho de partícula	11,0000	8,0000		9,5000
Quantidade de partículas por tamanho	4,8570	5,1540		5,0055
Entropia A_cinza	0,8490	0,8570		0,8530
Original MS	Padrão			
Amostra	Amostra 2	Amostra 7	Amostra 9	**Final**
Maior tamanho de partícula	13,0000	11,0000	17,0000	13,6667
Quantidade de partículas por tamanho	7,8890	4,7780	8,0000	6,8890
Entropia A_cinza	0,9590	0,9570	0,9530	0,9563
Austenitização MB	Padrão			
Amostra	Amostra 1	Amostra 2	Amostra 10	**Final**
Maior tamanho de partícula	3,0000	1,0000	1,0000	1,6667
Quantidade de partículas por tamanho	3,0000	1,0000	1,0000	1,6667
Entropia A_cinza	0,7900	0,7550	0,7650	0,7700
Austenitização ZTA	Padrão			
Amostra	Amostra 1	Amostra 6	Amostra 7	**Final**
Maior tamanho de partícula	28,0000	28,0000	28,0000	28,0000
Quantidade de partículas por tamanho	23,5000	22,5000	22,5000	22,8333
Entropia A_cinza	0,8810	0,8680	0,8680	0,8723
Austenitização MS	Padrão			
Amostra	Amostra 1	Amostra 2	Amostra 3	**Final**
Maior tamanho de partícula	21,0000	19,0000	23,0000	21,0000
Quantidade de partículas por tamanho	6,2000	6,6670	8,4000	7,0890
Entropia A_cinza	0,9650	0,9750	0,9680	0,9693
Reparo MB	Padrão			
Amostra	Amostra 7	Amostra 8	Amostra 9	**Final**
Maior tamanho de partícula	49,0000	49,0000	35,0000	44,3333
Quantidade de partículas por tamanho	47,5000	45,6670	30,3330	41,1667
Entropia A_cinza	0,9000	0,9190	0,9380	0,9190
Reparo ZTA	Padrão			
Amostra	Amostra 4	Amostra 5	Amostra 6	**Final**
Maior tamanho de partícula	12,0000	9,0000	8,0000	9,6667
Quantidade de partículas por tamanho	6,7270	6,4670	6,3910	6,5283
Entropia A_cinza	0,9710	0,9680	0,9640	0,9677
Reparo MS	Padrão			
Amostra	Amostra 7	Amostra 9	Amostra 10	**Final**
Maior tamanho de partícula	47,0000	33,0000	49,0000	43,0000
Quantidade de partículas por tamanho	32,0000	29,0000	43,7780	34,9260
Entropia A_cinza	0,9680	0,9780	0,9680	0,9713

Com os padrões devidamente calculados, inicia-se a segunda fase que toma uma amostra qualquer que não tenha gerado o padrão para sua respectiva classificação, então chegou-se na tabela 07 que mostra a seguir o retorno de cada amostra submetida a avaliação, com seu respectivo grau de evidência obtido pela CNAPa.

Tabela 7: Classificação das Amostras

Original MB	Classificação							
Amostra	Amost 1	Amost 3	Amost 4	Amost 5	Amost 6	Amost 8	Amost10	
Maior tamanho de partícula	16,0000	16,0000	16,0000	4,0000	15,0000	17,0000	16,0000	
Quantidade partículas por tamanho	16,0000	16,0000	16,0000	4,0000	15,0000	17,0000	16,0000	
Entropia A_cinza	0,7750	0,7720	0,7790	0,7550	0,7640	0,7810	0,7780	
	0,5190	**0,5180**	**0,5210**	**0,5320**	**0,5090**	**0,5370**	**0,5200**	**μ_E.**
	ok	**ok**	**ok**	**ok**	**ok**	**ok**	**ok**	Resp.
Original ZTA	Classificação							
Amostra	Amost 1	Amost 4	Amost 5	Amost 6	Amost 7			
Maior tamanho de partícula	11,0000	15,0000	8,0000	19,0000	12,0000			
Quantidade de partículas por tamanho	4,8570	9,4290	5,1540	15,0000	8,0000			
Entropia A_cinza	0,8490	0,8440	0,8570	0,7900	0,7990			
	0,5850	**0,5240**	**0,5470**	**0,5050**	**0,5680**			**μ_E.**
	ok	**ok**	**ok**	**ok**	**ok**			Resp
Original MS	Classificação							
Amostra	Amost 1	Amost 3	Amost 4	Amost 5	Amost 6	Amost 8	Amost10	
Maior tamanho de partícula	13,0000	11,0000	10,0000	14,0000	8,0000	5,0000	6,0000	
Quantidade de partículas por tamanho	7,8890	4,7780	6,1110	5,6000	5,0670	1,7000	4,2220	
Entropia A_cinza	0,9590	0,9570	0,9500	0,9420	0,9430	0,9500	0,9390	
	0,5850	**0,6010**	**0,6140**	**0,6300**	**0,5470**	**0,5500**	**0,5040**	**μ_E.**
	ok	**ok**	**ok**	**Aust.**	**ok**	**ok**	**ok**	Resp
Austenitização MB	Classificação							
Amostra	Amost 3	Amost 4	Amost 5	Amost 6	Amost 7	Amost 8	Amost 9	
Maior tamanho de partícula	3,0000	10,0000	3,0000	8,0000	10,0000	9,0000	2,0000	
Quantidade de partículas por tamanho	3,0000	9,5000	3,0000	8,0000	10,0000	8,5000	2,0000	
Entropia A_cinza	0,7900	0,7380	0,6950	0,6780	0,7280	0,7390	0,7170	
	0,5310	**0,4720**	**0,4950**	**0,5200**	**0,4970**	**0,4910**	**0,5310**	**μ_E.**
	ok	**ok**	**ok**	**ok**	**ok**	**ok**	**ok**	Resp
Austenitização ZTA	Classificação							
Amostra	Amost 2	Amost 3	Amost 4	Amost 5	Amost 8	Amost 9	Amost10	
Maior tamanho de partícula	28,0000	28,0000	21,0000	28,0000	6,0000	14,0000	18,0000	
Quantidade de partículas por tamanho	22,5000	23,5000	13,0000	22,5000	14,6670	8,5000	14,0000	
Entropia A_cinza	0,8670	0,8810	0,8210	0,8680	0,8250	0,8270	0,8200	
	0,5780	**0,5780**	**0,4860**	**0,5770**	**0,5350**	**0,5530**	**0,4850**	**μ_E.**
	ok	**ok**	**ok**	**ok**	**ok**	**ok**	**ok**	Resp

Continua

Tabela 7: Classificação das Amostras - Continuação

Austenitização MS	Classificação							
Amostra	Amost 4	Amost 5	Amost 6	Amost 7	Amost 8	Amost 9	Amost10	
Maior tamanho de partícula	12,0000	30,0000	19,0000	80,0000	21,0000	23,0000	27,0000	
Quantidade de partículas por tamanho	2,8000	8,5000	6,6670	78,5000	6,2000	3,2500	13,0000	
Entropia A_cinza	0,9570	0,9700	0,9750	0,8530	0,9650	0,9690	0,9650	
	0,6020	**0,5640**	**0,6270**	**0,4920**	**0,6530**	**0,5490**	**0,6020**	**μ_E.**
	ok	**ok**	**ok**	**ok**	**ok**	**ok**	**ok**	Resp
Reparo MB	Classificação							
Amostra	Amost 1	Amost 2	Amost 3	Amost 4	Amost 5	Amost 6	Amost10	
Maior tamanho de partícula	35,0000	49,0000	37,0000	47,0000	49,0000	12,0000	35,0000	
Quantidade de partículas por tamanho	34,0000	47,5000	35,0000	44,0000	45,6670	12,0000	30,3330	
Entropia A_cinza	0,8500	0,9000	0,8950	0,9180	0,9190	0,7900	0,9380	
	0,5310	**0,5050**	**0,6180**	**0,5300**	**0,5280**	**0,5160**	**0,5330**	**μ_E.**
	ok	**ok**	**ok**	**ok**	**ok**	**Orig.**	**ok**	Resp
Reparo ZTA	Classificação							
Amostra	Amos1	Amos2	Amost 3	Amost 7	Amost 8	Amost 9	Amost10	
Maior tamanho de partícula	5,0000	6,0000	5,0000	6,0000	6,0000	4,0000	6,0000	
Quantidade de partículas por tamanho	3,0530	2,0000	2,5260	3,4210	3,5000	0,6670	3,3680	
Entropia A_cinza	0,9500	0,9640	0,9560	0,9670	0,9680	0,9640	0,9580	
	0,4950	**0,5110**	**0,4960**	**0,5000**	**0,5030**	**0,5090**	**0,4980**	**μ_E.**
	ok	**Aust.**	**ok**	**ok**	**ok**	**ok**	**ok**	Resp
Reparo MS	Classificação							
Amostra	Amost 1	Amost 2	Amost 3	Amost 4	Amost 5	Amost 6	Amost 8	
Maior tamanho de partícula	44,0000	37,0000	33,0000	49,0000	37,0000	34,0000	48,0000	
Quantidade de partículas por tamanho	26,7500	29,2220	29,0000	43,7780	29,3330	30,0000	42,7780	
Entropia A_cinza	0,9640	0,9640	0,9780	0,9680	0,9650	0,9780	0,9680	
	0,5350	**0,5390**	**0,4970**	**0,5440**	**0,5380**	**0,4970**	**0,5520**	**μ_E.**
	Aust.	**ok**	**ok**	**ok**	**ok**	**ok**	**ok**	Resp

Efetuando uma análise final dos resultados pode-se sinalizar através da tabela 08, as porcentagens de acerto e erro nas classificações das amostras nos diversos tipos de solda.

Tabela 8: Resultados final das amostras classificadas

Tipo de Solda	Acerto	Erro
Original MB	100%	0%
Original ZTA	100%	0%
Original MS	86%	14%
Austenitização MB	100%	0%
Austenitização ZTA	100%	0%
Austenitização MS	100%	0%
Reparo MB	86%	14%
Reparo ZTA	86%	14%
Reparo MS	86%	14%

4 DISCUSSÕES

A continuidade e evolução de trabalhos acadêmicos pode ser conseguida com a inspiração de colegas que realizam estudos na mesma área de atuação. A dissertação GASPAR, 2013, com a evidência das regiões de solda, sendo o início da inspiração, seguido pela percepção de MARIO, et al., 2018 para o estudo de imagens digitais foram as bases para as discussões e metodologias desse trabalho.

No decorrer dessa pesquisa foram realizados estudos de tratamento do aço inoxidável austenítico 316L assim como de inteligência artificial para análise de imagens digitais. Lógica de padrões para classificação de amostras.

Esse material foi escolhido devido sua utilização em larga escala em indústrias *offshore*, *onshore*, gases especiais, indústria química e petroquímica.

Escolhido o tratamento de austenitização com resfriamento lento após atingir a temperatura de 1050^{o}C exatamente para evidenciar a fase $(FeCr)_4C$ dissolvendo na austenita, precipitando e se localizando nos contornos dos grãos. Essa precipitação reduz a resistência à corrosão do material e gerou imagens digitais evidenciando estruturas cristalinas diferentes da original tendo assim um excelente ponto de análise. Essa tratativa pode ser realizada como um meio de inspeção e reprovação do material.

O processo de reparo não é aconselhável quando utilizado em fluidos de alta pressão (até 60.000psi) pois a precipitação da fase $(FeCr)_4C$ inicia-se a partir de 450^{o}C podendo assim ao longo do tempo gerar corrosão e consequentemente pontos de tensão. A ruptura de uma tubulação nessa pressão pode causar graves acidentes.

A estrutura cristalina, obtida através da imagem digital, apresentou resultado diferente da original, sendo assim possível ser analisada através de comparação entre elas. Uma comparação automática entre as imagens de micrografia digital obtidas através de vários experimentos de parâmetros e tratamentos do processo de soldagem orbital *GTAW* foi feita e geraram amostras de padrões para posterior, de outras imagens digitais, efetuar a classificação dessas novas amostras.

A identificação das similaridades entre as microestruturas foi possível de se evidenciar quando utilizada a lógica Paraconsistente e foi possível assegurar que o método é robusto para a aplicação desejada. Foi provado através de tabelas de comparação que o resultado experimental pôde ser alcançado para acurácia de detecção dos tipos de tratamento e identificação dos tipos de regiões de solda mesmo com a complexidade das imagens digitais obtidas.

Nesse estudo foi apresentado um modelo capaz o suficiente para analisar a classificação suportado na lógica Paraconsistente anotada. Original MS, Reparo MB, Reparo ZTA e Reparo MS tiveram umas das amostras classificadas como outro tipo.

A arquitetura do modelo Paraconsistente proposto é factível e o resultado mostra que é possível substituir a checagem humana na metalografia de amostras de micrografia e pode ser facilmente adaptada para cada tipo de peculiaridade de variações de soldagem e de diferentes tipos de materiais.

O modelo provou ser aplicável para esse tipo de processo de soldagem e apresentou resultados satisfatórios mesmo que nem todas as amostras da classificação foram classificadas de acordo com o padrão.

O maior erro foi de 14% em algumas condições experimentais. Esse fato pode ser corrigido se a imagem não apresentar contrastes e sombras obtidos no ensaio metalográfico. É a possível principal razão pela qual a precisão de detecção não pôde atingir 100%.

5 CONCLUSÕES

Esta pesquisa apresentou CNAPa como meio de classificação de amostras extraídas de imagens digitais, sendo os parâmetros do processo de soldagem GTAW e tratamentos térmicos, utilizados para alterar a metalografia do metal utilizado. Este sistema foi idealizado de acordo com revisão bibliográfica. Técnica usada em diferentes áreas industriais, altamente importante e que necessita de controle no seu uso. Este trabalho objetiva observar na prática as diferentes transformações microestruturais do aço inoxidável austenítico após a soldagem e diferentes tipos de tratamento. O modelo computacional da rede de análise paraconsistente juntamente com os ensaios realizados, além de servirem como padrão e classificação, podem ser adaptados para outros tipos de inspeção de solda, outros processos de soldagem, diferentes materiais e diferentes formas de se captar uma imagem digital. Em trabalhos futuros pode-se incluir a microestrutura do aço inoxidável austenítico endurecido por encruamento. Pode-se também utilizar a mesma técnica para os aços inoxidáveis martensíticos e ferríticos, sendo que os martensíticos podem ser temperados aliando dureza com resistência à corrosão e resistência ao desgaste. Os ferríticos podendo ser endurecidos por encruamento e como único tratamento térmico aplicável o recozimento ou “recristalização”. Apresentando o fenômeno de fragilidade à 475^{o}C quando expostos por longos períodos nessa temperatura ou quando resfriados lentamente, o que ocasiona a precipitação da ferrita. Então isso pode ser observado por microscopia e analisado pela rede neural. Sendo o maior erro, 14%, em algumas condições experimentais é possível para trabalhos futuros a melhoria da rede para que consiga alcançar resultados de classificação de 100% em todas as amostras. O trabalho apresentado demonstra que existe um vasto campo para ser explorado com o modelo computacional da Rede de Análises Paraconsistentes e processos de soldagem. Enfim, é possível utilizar outros tipos de critérios e outros tipos de lógica para modelos de comparações entre padrões e classificação. Considerando a necessidade de validações nos procedimentos de soldagem, sendo uma delas em tubulações para utilização com fluidos de baixa, média e alta pressão, o presente modelo de caracterização pode ser adaptado e refinado para aplicações relativas nessa área.

REFERÊNCIAS

BARBOSA, R. P.; CAMPOS, S. G. S. e DA FONSECA, M. A. **Recristalização de um Aço Inoxidável Austenítico/Uma Abordagem Estatística**. Dept. Engenharia Mecânica, Unileste, MG, 2004.

BARNEA, D. I. e SILVERMAN, H. F. **A class of algorithms for fast digital image registration**. IEEE transactions on Computers, v. 100, n. 2, p. 179-186, 1972.

BRACARENSE, A. Q. e HORIZONTE, B. **Processo de soldagem TIG-GTAW**. Belo Horizonte: Universidade Federal de Minas Gerais, 2000.

BHADESHIA, H. e HONEYCOMBE, R. **Steels: microstructure and properties**. Butterworth-Heinemann, 2017.

CALLISTER JR, W. D. **Ciência e Engenharia de Materiais: Uma Introdução**, 5ª Edição. Rio de Janeiro, 2002.

CANALE, L.C.F; ROLLO, J.M.D.A. **Aços inoxidáveis de transformação controlada. Metalurgia e Materiais,** São Paulo, SP, v. 49, n. 413, p. 23-27, 1993.

CHIAVERINI, V. **Tratamentos térmicos das ligas metálicas**. ABM, 2003.

COLPAERT, H. **Metalografia dos produtos siderúrgicos**. São Paulo, SP: Editora Edgard Blucher, 1974.

DA COSTA, N. C. A. & Marconi D. **An overview of paraconsistent logic in the 80's**, *J. Non-Class Log.* 6(1), pag.5-31, 1989.

DA SILVA FILHO, J. I. **Treatment of uncertainties with algorithms of the paraconsistent annotated logic. Journal of Intelligent Learning Systems and Applications**, v. 4, n. 02, p. 144, 2012.

DA SILVA FILHO; J.I.; ABE, J.M. & Lambert-Torres, G. **Uncertainty treatment using paraconsistent logic—introducing paraconsistent artificial neural networks**. Volume 211 of Frontiers in Artificial Intelligence and Applicaations, 328 paginas. IOS Press, Amsterdam, 2010.

DA SILVA FILHO, J. I.; ABE, J. M**. Fundamentos das Redes Neurais Paraconsistentes–Destacando Aplicações em Neurocomputação**. Arte & Ciência, 2001.

FERRAZ, J. C.; LEÃO, I. SANTOS, R. L. C.; PORTELA, I. M. **Estudo da competitividade de cadeias produtivas integradas no Brasil: Impacto das zonas de livre comércio** – Cadeia: Industria Naval,p, 1-48, Universidade Estadual de Campinas, Campinas, 2002.

GASPAR, N. J. **Potencial uso do passe de revenimento no reparo de soldas; Avaliação via mapeamento de durezas**. Dissertação (Mestrado em Engenharia Mecânica) –Universidade Santa Cecilia, Santos-SP, 2013.

GENEVOIS, C.; DESCHAMPS, A.; VACHER, P. **Comparative study on local and global mechanical properties of 2024 T351, 2024 T6 and 5251 O friction stir welds. Materials Science and Engineering**: A, v. 415, n. 1-2, p. 162-170, 2006.

GENSLER, H.J. **Introduction to Logic**. Second Edition. New York: Routledge's, 2010.

GONZALEZ, R. C.; WOODS, R. E. **Digital imaging processing**. Massachusetts: Addison-Wesley, 1992.

GONZALEZ, R. C. et al. **Digital image processing using MATLAB**. Publisher T. Robbins, Printed in USA, v. 11, p. 531-534, 2009.

JAIN, A. K. **Fundamentals of digital image processing**. Englewood Cliffs, NJ: Prentice Hall, p 569, 1989.

KROLCZYK, G. M. et al. **Influence of argon pollution on the weld Surface Morphology. Measurement,** v. 70, p. 203-213, 2015.

LEMES NETO, M.C. & VENSON, N. **Lógica Paraconsistente**. Artigo Técnico – Departamento de Informática e Estatística – INE, UFSC, Florianópolis, SC. - 2002. Disponível em: http://www.inf.ufsc.br/~j.barreto/trabaluno/TC_Nerio_Mauricio.pdf. Acessado em: 05 fev 2019.

LOTHONGKUM, G.; VIYANIT, E.; BHANDHUBANYONG, P. **Study on the effects of pulsed TIG welding parameters on delta-ferrite content, shape factor and bead quality in orbital welding of AISI 316L stainless steel plate**. Journal of Materials Processing Technology, v. 110, n. 2, p. 233-238, 2001.

MACHADO, R.C.S., **Estudo E Projeto De Conversor Cc-Cc Com Elo De Alta Frequência Aplicado A Máquina De Soldagem A Arco Elétrico**, Programa de Pós-Graduação em Engenharia Elétrica da Universidade Federal de Minas Gerais, Dissertação Mestrado, 2015.

MACLEOD, C. **Heroes of Invention: Technology, Liberalism and British Identity**, 1750-1914. Cambridge University Press, New York, 2008.

MARIO, M. C. **Proposta de Aplicação das Redes Neurais Artificiais Paraconsistentes como Classificador de Sinais utilizando Aproximação Funcional** - Dissertação de Mestrado-UFU, Uberlândia-MG - 2003.

MARIO, M. C. et al.; **Paraconsistent artificial neural network as auxiliary in cephalometric diagnosis. Artificial organs**, v. 34, n. 7, p. E215-E221, 2010.

MARIO, M. C. et al.; **Paraconsistent Logic applied in the metallography of welds classification through morphological characteristics and entropy of digital images**. In: Journal of Physics: Conference Series. IOP Publishing, p. 012168, 2018.

MARRO, A. A. et al**.; Lógica fuzzy: conceitos e aplicações**. Natal: Universidade Federal do Rio Grande do Norte (UFRN), 2010.

MARSHALL, P. **Austenitic stainless steels: microstructure and mechanical properties**. Springer Science & Business Media, 1984.

MARTINS, E. P. et al. **Efeito do encruamento na cinética de nitretação dos aços inoxidáveis austeníticos**. 2010.

MODENESI, P. J. **Introdução à física do arco elétrico e sua aplicação na soldagem dos metais**. Belo Horizonte: UFMG, 2007.

NORRISH, J. **Advanced welding processes**. Elsevier, ISBN: 9781845691301, 2006.

PAIVA, T. C. C. et al. **Análise da influência do gás de purga na raiz de juntas soldadas pelo processo GTAW em aço inoxidável superduplex UNS S32750**. Soldagem & Inspeção, v. 19, n. 2, p. 125-133, 2014.

PASCOALI, S. **Tecnologia dos Materiais I**. CEFET–SC. Araranguá, 2008.

PEDRINI, H. e SCHWARTZ, W. R.. **Análise de imagens digitais: princípios, algoritmos e aplicações**. Thomson Learning, 2008.

PIGOZZO, I. O. et al. **Soldagem TIG orbital: otimização de equipamentos e prospecções tecnológicas para procedimentos de passe de raiz**. 2015.

SANDVIK S. **Corrosion handbook stainless steels**. Sandvikens Tryckeri. Sandviken, Suécia, Março 1999

SCHWEDERSKY, M. B. et al. **Estudo e desenvolvimento do processo TIG duplo eletrodo**. Universidade Federal Santa Catarina, 2015.

UNGER H. e TANYA S. **Introductory digital image processing: A remote sensing perspective**. 2007.

VEIGA, B. H. **Composição, fabricação e análise de eletrodo revestido**. 2011.

VILARINHO, L. O. **O arco TIG a 100 A e Argônio Puro é um Arco Especial**. Soldagem e Inspeção, v. 14, n. 4, p. 353-357, 2009.

YAN, J.; GAO, M.; ZENG, X. **Study on microstructure and mechanical properties of 304 stainless steel joints by TIG, laser and laser-TIG hybrid welding**. Optics and Lasers in Engineering, v. 48, n. 4, p. 512-517, 2010.

APÊNDICE - A

Programa Padrão

```
%criação do padrão de cada tipo de solda
clear;
clc;
media=xlsread('padrao.xls');
disp('Dado inicial....');
disp(' ');
%caminho=input('Dê o caminho onde estão os arquivos: ','s');
resp='s';
while resp=='s' || resp=='S'
  clc;
  caminho='D:\Área de Trabalho\MAURICIO_v1\imagens_finais\Original_MB';
  disp('+--------------------+');
  disp('|  M E N U - SOLDA   |');
  disp('|                    |');
  disp('| 1. Original MB     |');
  disp('| 2. Original ZTA    |');
  disp('| 3. Original MS     |');
  disp('| 4. Revenimento MB  |');
  disp('| 5. Revenimento ZTA |');
  disp('| 6. Revenimento MS  |');
  disp('| 7. Reparo MB       |');
  disp('| 8. Reparo ZTA      |');
  disp('| 9. Reparo MS       |');
  disp('|                    |');
  disp('+--------------------+');
  disp(' ');
  op=input('Dê sua opção: ');
  while op<1 && op>9
    op=input('Dê sua opção: ');
  end
  disp(' ');
  n=input('Determine a quantidade de amostra desse tipo: ');
  while n<=0
    n=input('Determine a quantidade de amostra desse tipo: ');
  end
  i=1; s1=0;s2=0;s3=0;
  while i<=n
   arquivo=input('Dê o nome do arquivo: ','s');
```

```
msg=[caminho '\' arquivo];
disp(' ');
disp('Lendo a imagem original');
A = imread(msg);
respg=input('Ver os gráficos da operação de erosão? s ou n? ','s');
if respg=='s' || respg=='S'
   subplot(1,2,1),imshow(A); %
   bw =~im2bw(A,0.5); bw = imfill(bw,'holes');
   subplot(1,2,2), imshow(bw);
end
bw =~im2bw(A,0.5); bw = imfill(bw,'holes');
[L,num_0]=bwlabel(bw);
se = strel('disk',2);
count = 0;
num = num_0;
media_P = 0;
while num > 0
  count = count + 1;
  bw = imerode(bw,se);
  [L,num]=bwlabel(bw);
  P(count)=num_0-num;
  media_P = media_P + P(count);
end
respg=input('Ver os gráficos da quantidade de partículas por tamanho? s ou n? ','s');
if respg=='s' || respg=='S'
   figure(2);
   subplot(1,2,1),plot(0:count,[0 P],'ro');axis square;
   xlabel('Size');ylabel('Particles removed')
   subplot(1,2,2),plot(diff([0 P]),'k*');axis square;
   xlabel('Size');ylabel('Particles removed')
end
disp(' ');
disp(' Dados da imagem analizada....');
disp(' ');
fprintf('maior tamanho de partícula  = %6.3f \n', P(count));
fprintf('Quantidade de tamanhos = %6.3f \n', count);
fprintf('Quantidade de partículas por tamanho  = %6.3f \n', media_P/count);
%caracterização da entropia
A_cinza = rgb2gray(A);%converte a imagem em escala de cinza
[nrows,ncols] = size(A_cinza);%lê dimensão linha x coluna da imagem
```

```
    fprintf('linhas = %6.3f \n', nrows);
    fprintf('colunas = %6.3f \n', ncols);
    %E = entropy(A)/8;
    %fprintf('entropia A = %6.3f \n', E);
    F = entropy(A_cinza)/8;
    fprintf('entropia A_cinza = %6.3f \n \n', F);

    %totalização para o cálculo da média
    s1=s1+(media_P/count);
    s2=s2+count;
    s3=s3+F;
    i=i+1;
  end
  %armazenamento do valor médio de acordo com a opção.
  media(1,op)=s1/n;
  media(2,op)=s2/n;
  media(3,op)=s3/n;
  %gravando o xls
  disp(' ');
  disp('Aguarde... gravando o arquivo');
  dado=xlswrite('D:\Área de Trabalho\MAURICIO_v1\padrao.xls',media,1,'A1: K3');

  resp=input('Novo lote de amostra? s ou n?','s');
  while resp~='s'&& resp~='S' && resp~='n' && resp~='N'
     resp=input('Novo lote de amostra? s ou n?','s');
  end
end
```

APÊNDICE - B

Programa Classificação:

```
%estudo da amostra para futura classificação
resp='s';
while resp=='s' || resp=='S'
  clc; clear;
  disp(' ');
  %captura da imagem da amostra
  %caminho=input('Dê o caminho onde estão os arquivos: ','s');
  caminho='D:\Área de Trabalho\MAURICIO_v1\Imagens_teste_final\Reparo ZTA\Classificação';
  arquivo=input('Dê o nome do arquivo: ','s');
  msg=[caminho '\' arquivo];
  disp('------------------------------------------------------------');
  %definição da erosão por imagem.
  A = imread(msg);
  respg=input('Ver os gráficos da operação de erosão? s ou n? ','s');
  if respg=='s' || respg=='S'
    subplot(1,3,1),imshow(A); %('imagem que se deseja analisar')
    bw =~im2bw(A,0.5); bw = imfill(bw,'holes');
    subplot(1,3,2), imshow(bw);
  end
  bw =~im2bw(A,0.5); bw = imfill(bw,'holes');
  [L,num_0]=bwlabel(bw);
  se = strel('disk',2);
  count = 0; num = num_0; media_P = 0;
  while num > 0
    count = count + 1;
    bw = imerode(bw,se);
    [L,num]=bwlabel(bw);
    P(count)=num_0-num;
    media_P = media_P + P(count);
  end
  media_partículas_dim = media_P/count;
  qtd_dimensoes = count;
  %definição da quantidade de partículas por tamanho e seu gráfico
  respg=input('Ver os gráficos da quantidade de partículas por tamanho? s ou n? ','s');
  if respg=='s' || respg=='S'
    figure(2);subplot(1,2,1),plot(0:count,[0 P],'ro');axis square;
    xlabel('Size');ylabel('Particles removed')
    subplot(1,2,2),plot(diff([0 P]),'k*');axis square;
```

```
end
%resultados da amostra
fprintf('maior tamanho de partícula  = %6.3f \n', P(count));
fprintf('Quantidade de tamanhos = %6.3f \n', qtd_dimensoes);
fprintf('Quantidade de partículas por tamanho  = %6.3f \n', media_partículas_dim);
A_cinza = rgb2gray(A);%converte a imagem em escala de cinza
[linhas,colunas] = size(A_cinza);%lê dimensão linha x coluna da imagem
fprintf('linhas_cinza = %6.3f \n', linhas);
fprintf('colunas_cinza = %6.3f \n', colunas);
entropia = entropy(A_cinza)/8;
fprintf('entropia A_cinza = %6.3f \n', entropia);
%lendo os valores padrões
padrao=xlsread('padrao.xls');
for j=1:9
  rnpc(1,j)=1/exp(abs(padrao(1,j) - media_partículas_dim)); %calcula morf_pdim
  rnpc(2,j)=1/exp(abs(padrao(2,j) - qtd_dimensoes));        %calcula morf_ndim
  rnpc(3,j)=1/exp(abs(padrao(3,j) - entropia));             %calcula entropia
  rnpc(4,j)=(rnpc(2,j)-(1-rnpc(1,j))+1)/2;                  %calcula evidência_morf
  rnpc(5,j)=(rnpc(4,j)-(1-rnpc(3,j))+1)/2;                  %calcula evidência_tipo
end
j=1;
for i=1:3
  ev(i,1)=(rnpc(5,j)-(1-rnpc(5,j+1))+1)/2;                  %evidencia do tipo parcial
  j=j+3;
end
j=3;
for i=1:3
  evf(i,1)=(ev(i,1)-(1-rnpc(5,j))+1)/2;                     %evidencia do tipo final
  j=j+3;
end
disp('------------------------------------------------------------');
%SAÍDA DA REDE PARACONSISTENTE - SISTEMA ESPECIALISTA
if ((evf(1,1) > evf(2,1))&& (evf(1,1) > evf(3,1)))
  fprintf('Solda do tipo Original com evidência = %6.3f \n', evf(1,1));
elseif ((evf(2,1) > evf(1,1))&& (evf(2,1) > evf(3,1)))
  fprintf('Solda do tipo Revenimento com evidência = %6.3f \n', evf(2,1));
elseif ((evf(3,1) > evf(1,1))&& (evf(3,1) > evf(2,1)))
  fprintf('Solda do tipo Reparo com evidência = %6.3f \n', evf(3,1));
elseif ((evf(1,1) == evf(2,1))&& (evf(1,1) > evf(3,1)))
  fprintf('Solda do tipo Original ou Revenimento com evidência = %6.3f \n', evf(1,1));
```

```
  elseif ((evf(1,1) == evf(3,1))&& (evf(1,1) > evf(2,1)))
    fprintf('Solda do tipo Original ou Reparo com evidência = %6.3f \n', evf(1,1));
  elseif ((evf(3,1) == evf(2,1))&& (evf(3,1) > evf(1,1)))
   fprintf('Solda do tipo Revenimento ou Reparo com evidência = %6.3f \n', evf(2,1));
  else
   fprintf('Solda de tipo indeterminado \n');
  end
  resp=input('Nova amostra? s ou n? ','s');
  while resp~='s' && resp~='S' && resp~='n' && resp~='N'
     disp('Resposta errada... tente novamente!');
     resp=input('Nova amostra? s ou n? ','s');
  end
end
```