



UNIVERSIDADE FEDERAL DO PARÁ
INSTITUTO DE TECNOLOGIA
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA INDUSTRIAL

CÍCERO ALBERTO PEREIRA BELÉM

**ESTUDO DO DESEMPENHO ENTRE OS PROCESSOS DE SOLDAGEM SMAW E
GMAW PARA RETIFICAÇÃO DE REVESTIMENTOS EM EIXOS PROPULSORES**

BELÉM

2019

CÍCERO ALBERTO PEREIRA BELÉM

**ESTUDO DO DESEMPENHO ENTRE OS PROCESSOS DE SOLDAGEM SMAW E
GMAW PARA RETIFICAÇÃO DE REVESTIMENTOS EM EIXOS PROPULSORES**

Dissertação apresentada ao Programa de Pós Graduação em Engenharia Industrial do Instituto de Tecnologia da Universidade Federal do Pará para obtenção do grau de Mestre em Engenharia Industrial. Área de Concentração: Materiais e Metalurgia.

Orientador: Prof. Dr. Alessandro de Castro Corrêa

BELÉM

2019

CÍCERO ALBERTO PEREIRA BELÉM

ESTUDO DO DESEMPENHO ENTRE OS PROCESSOS DE SOLDAGEM SMAW E GMAW PARA RETIFICAÇÃO DE REVESTIMENTOS EM EIXOS PROPULSORES

Dissertação apresentada ao Programa de Pós Graduação em Engenharia Industrial do Instituto de Tecnologia da Universidade Federal do Pará para obtenção do grau de Mestre em Engenharia Industrial. Área de Concentração: Materiais e Metalurgia.

Defesa: 11 de abril de 2019.

Banca examinadora:

_____ - Orientador
Prof. Dr. Alessandro de Castro Corrêa
Instituto Federal do Pará – IFPA

_____ - Membro Interno
Prof. Dra. Elza Monteiro Leão Filha
Instituto Federal do Pará – IFPA

_____ - Membro Externo
Prof. Dr. Alexandre Saldanha do Nascimento
Universidade Federal do Pará/UFPA

A Deus, minha esposa, meus pais e meus irmãos.

AGRADECIMENTOS

A Deus, sem ele nada seria possível.

À educação e carinho da minha mãe Maria Dantas e de meu pai Cícero Adriano.

A meus irmãos Ariel, Marcos e Mateus.

A minha esposa Cícera Gisleide Araujo Oliveira Belém, pelo apoio e carinho incondicional.

Ao Professor Paulo D'Angelo, grande Mestre, amigo e incentivador.

Ao Professor Dr. Alessandro pela orientação e paciência.

Ao grande amigo Hermano pelas palavras de apoio.

RESUMO

O objetivo desse trabalho é avaliar os processos de retificação de eixo propulsor naval, elemento responsável pela transmissão de força e potência a hélices de navios. Para tanto, busca-se replicar, em laboratório, os procedimentos de retificação do eixo propulsor que, constantemente, apresentam problemas de desgaste devido ao atrito entre o eixo e seus pontos de apoio (mancais). Em virtude do intenso uso desse tipo de transporte, é frequente a manutenção da linha de eixo dessas embarcações, havendo a necessidade de uma análise que verifique se os métodos utilizados seguem padrões normatizados e que passem por testes de qualificação. O estudo se justifica pelo potencial hidrográfico da Região Amazônica, a qual possui bacias como Solimões-Amazonas e Rio Madeira, que servem como vias de acesso e de transporte de pequenas, médias e grandes embarcações; seus afluentes são verdadeiras estradas fluviais, sendo um modal hidroviário de importância histórica e cultural. Para o levantamento de parâmetros de soldagem, foram confeccionados trinta corpos de provas, cinco para cada processo com sua ramificação. As operações em laboratório seguiram as etapas: soldagem dos Corpos de Prova pelos processos Shielded Metal Arc Welding-SMAW (utilizado na maioria das empresas de retificação de eixos na região Norte) e Gas Metal Arc Welding-GMAW com dois métodos (automatizado e manual) e com adição de dois metais de solda diferentes (307, 309L com e sem adição de Nióbio). As avaliações envolveram ensaios por Líquido Penetrante (LP), Metalografia, Análise Macrográfica e Micrográfica, Análise de Microdureza e análise de imagem de Espectroscopia por Dispersão de Energia de Raios X-EDS, Elétrons Secundários- SE e retroespalhamento de electrons-BSE fornecidas pelo Microscópio Eletrônico de Varredura-MEV. Foram realizados testes estatísticos para comparação dos indicadores dos processos - Análise de Variância de um fator (Anova) ou o teste Van Der Waerden - e, posteriormente, os testes de multicomparações, conforme as características das amostras. Finalmente, compararam-se os desempenhos dos processos de forma conjunta com o apoio do método multiatributo Avaliação Proporcional Complexa (COPRAS). Os resultados indicaram que as Taxas de Deposições do processo GMAW são maiores que no processo SMAW, assim tornando o processo a gás mais eficiente. Em relação à Energia de Soldagem, tende-se a diminuí-la para evitar deformações excessivas, assim todos os processos mostraram-se com uma taxa elevada para esse indicativo, especialmente no processo SMAW e no GMAW manual com o arame 307. Quanto ao Rendimento Econômico, houve aceitabilidade nas réplicas, confirmando o levantamento de parâmetros, pois os resultados foram acima de 100%, colocando em destaque de inaceitabilidade deste indicativo.

Nos perfis macrográficos, observou-se similaridade entre as imagens dos corpos de prova no levantamento de parâmetros e as réplicas. A Relação Reforço/Largura obteve um aumento de 49,9% em relação à média das réplicas e ao valor do corpo de prova do levantamento de parâmetros no processo GMAW com 309 L e adição de Nióbio, a qual se justifica pois não temos o controle direto do incremento da fita de Nióbio na poça de fusão, porém ainda tivemos uma relação abaixo de 0,30 proposto pela literatura. Todos os processos com suas ramificações apresentaram um elevado índice de diluição, contudo o processo SMAW apresentou maior Diluição em relação ao processo GMAW e suas ramificações. Sugere-se, em futuros experimentos, a diminuição da diluição para que o revestimento não fique com propriedades semelhantes ao substrato. Com relação ao ensaio de Microdureza, observou-se que o processo com adição de Nióbio aumentou significativamente a dureza do revestimento, qualificando esse processo. A avaliação multiatributo indicou que o processo a gás com 309 L e adição de Nióbio prevaleceu sobre os demais, qualificando esse como o melhor método para fabricação de revestimento em eixos navais com metal de base 316 L.

Palavras-chaves: Retificação. Soldagem de eixo naval. GMAW. SMAW. Multiatributo.

ABSTRACT

The objective of this work is to evaluate the processes of rectification of the naval propeller shaft, element responsible for the transmission of force and power for the propellers of ships. In order to do so, it is sought to replicate, in the laboratory, the propeller shaft grinding procedures, which constantly present wear problems due to the friction between the shaft and its bearings. Due to the intense use of this type of transport, it is frequent to maintain the axis line of these vessels, and there is a need for an analysis that verifies that the methods used follow standardized standards and undergo qualification tests. The study is justified by the hydrographic potential of the Amazon Region, which has basins such as Solimões-Amazonas and Rio Madeira, which serve as access routes and transport of small, medium and large vessels; its tributaries are true fluvial roads, being a mode waterway of historical and cultural importance. For the survey of welding parameters, thirty test bodies were made, five for each process with its branching. Laboratory operations followed the steps: Welding of the Test Bodies by Shielded Metal Arc Welding (SMAW) and Gas Metal Arc Welding (GMAW) with two methods (automated and manual) and with the addition of two different solder metals (307, 309L with and without addition of Niobium). The evaluations involved tests by Penetrating Liquid (LP), Metallography, Macrographic and Micrographic Analysis, Microhardness Analysis and image analysis of X-ray Energy Dispersion Spectroscopy, Secondary Electrons-SE and backscattering of BSE electrons provided by the Microscope Electronic Scanning - SEM. Statistical tests were performed to compare the indicators of the processes. The Analysis of Variance of one factor (Anova) or the Van Der Waerden test, and, later, the multicomparison test, according to the characteristics of the samples. Finally, the process performances were compared in a joint way with the support of the Multi-attribute Complex Proportional Evaluation (COPRAS) method. The results indicated that the Deposition Rates of the GMAW process are higher than in the SMAW process, thus making the gas process more efficient. In relation to the Welding Energy, it is tended to decrease the same to avoid excessive deformations, thus all processes showed a high rate for this indicative, in particular the SMAW process and the manual GMAW process with the wire 307. The Economic Income, there was acceptability in the replicates, confirming the survey of parameters, since the results were above 100%, highlighting the unacceptability of this indicator. In the macrographic profiles, similarity was observed between the images of the specimens in the collection of parameters and the replicas. The Reinforcement / Width Ratio obtained an increase of 49.9% in relation to the average of the replicates and the value of the

test specimen of the GMAW process with 309 L and addition of Niobium, which is justified, since we do not have the control directly from the Niobium ribbon increment in the fusion pool, but still had a relationship below 0.30 proposed in the literature. All the processes with their branches had a high dilution index, however, the SMAW process presented higher Dilution in relation to the GMAW process and its ramifications. It is suggested, in future experiments, the decrease of the dilution so that the coating does not have similar properties to the substrate. With respect to the Microhardness test, it was observed that the process with addition of Niobium significantly increased the hardness of the coating, qualifying this process. The multi-attribute evaluation indicated that the gas process with 309 L and addition of Niobium prevailed over the others, qualifying this as the best method for manufacturing coating on naval shafts with base metal 316 L.

Key words: Rectification. Welding. GMAW. SMAW. Multiattribute.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 - Eixo Propulsoe revestido pelo processo SMAW.....	19
Figura 2 - Esquemática do processo SMAW	21
Figura 3 - Esquema representativo da soldagem GMAW	22
Figura 4 - Representação das grandesas geométricas do cordão de solda	24
Figura 5 - Diagrama esquemático dos diferentes modos de solidificação para relação G/\sqrt{R} . 25	
Figura 6 - Fonte de Soldagem	28
Figura 7 - Ensaio por Líquido Penetrante. CP 23- Processo SMAW; CP 01- GMAW automatizado com 307; CP 12- GMAW manual com 307; CP 09- GMAW manual com 309 L; CP 19- GMAW automatizado com 309 L e CP 26- GMAW automatizado com 309 L e adição de Nióbio	39
Figura 8 -Taxa de deposição, Teste dos pressupostos, Análise de Shapiro-Wilk	42
Figura 9 - Energia de Soldagem, Teste dos pressupostos, Análise de Shapiro-Wilk	44
Figura 10 - Rendimento Econômico, Teste dos pressupostos, Análise de Shapiro-Wilk.....	45
Figura 11 - Perfis macrográficos dos Corpos de Prova	47
Figura 12 - Perfis macrográficos (réplicas).....	47
Figura 13 - Relação reforço/largura, Teste dos pressupostos, Análise de Shapiro-Wilk.....	51
Figura 14 - Diluição. Teste dos pressupostos, análise de Shapiro-Wilk.....	53
Figura 15 - Micrografia dos corpos de prova	55
Figura 16 - Gráfico de microdureza do CP1	58
Figura 17 - Gráfico de microdureza CP's 2 e 3 respectivamente	58
Figura 18 - Gráfico de microdureza CP's 4 e 5 respectivamente	59
Figura 19 - Gráfico de microdureza CP 6	59
Figura 20 - Identação no CP do processo SMAW.....	60
Figura 21 - Identação no CP do processo GMAW automatizado com 307	60
Figura 22 - Identações no CP do processo GMAW manual com 307	60
Figura 23 - Identação no CP do processo GMAW manual com 309 L	60
Figura 24 - Identação no CP do processo GMAW automatizado com 309 L.....	61
Figura 25 - Identação no CP do processo GMAW automatizado com 309 L e adição de Nióbio.....	61
Figura 26 - Microdureza. Teste dos pressupostos, análise de Shapiro-Wilk	62
Figura 27 - Imagem SE 15 x, processo GMAW automatizado com 309 L e adição de Nióbio	64

Figura 28 - Imagem SE:a: 2 kx e b: 10kx	65
Figura 29 - Imagem SE (a) e BSE (b).....	65
Figura 30 - Imagem EDS global com o espectro da soma dos mapas.....	66
Figura 31 - Imagem EDS, espectro 1.....	66
Figura 32 - Imagem EDS, espectro 2.....	66
Figura 33 - Imagem EDS, espectro 3.....	67
Figura 34 - Imagem EDS, espectro 4.....	67
Figura 35 - Imagem EDS, espectro 5.....	67
Figura 36 - Imagem EDS, espectro 6.....	68
Figura 37 - Imagem EDS, espectro 7.....	68
Figura 38 - Imagem EDS, espectro 8.....	68
Figura 39 - Imagem EDS, espectro 9.....	69
Figura 40 - Imagem EDS, espectro 10.....	69

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 - Composição química do Aço Inoxidável 316L.....	30
Tabela 2 - Composição química do Eletrodo 309 L.....	30
Tabela 3 - Composição química do arame ER 307	30
Tabela 4 - Composição química do arame ER 309 L	31
Tabela 5 - Processos de soldagem com os respectivos metais de adição e parâmetros.....	32
Tabela 6 - Processo de soldagem SMAW AWS E 309 L com os respectivos corpos de prova e parâmetros	32
Tabela 7 - Processos de soldagem GMAW automatizado AWS AR 307 com os respectivos corpos de prova e parâmetros	32
Tabela 8 - Processos de soldagem GMAW manual AWS AR 307 com os respectivos corpos de prova e parâmetros	33
Tabela 9 - Processos de soldagem GMAW manual AWS AR 309 L com os respectivos corpos de prova e parâmetros	33
Tabela 10 - Processos de soldagem GMAW automatizado AWS AR 309 L com os respectivos corpos de prova e parâmetros	33
Tabela 11 - Processos de soldagem GMAW automatizado AWS AR 309 L (adição de Nióbio) com os respectivos corpos de prova e parâmetros.....	33
Tabela 12 - Resultados da Taxa de deposição, Energia de soldagem, Taxa de fusão e Rendimento econômico.....	39
Tabela 13 - Dados para cálculo da taxa de deposição, energia de soldagem, taxa de fusão e Rendimento econômico do processo SMAW.....	40
Tabela 14 - Dados para cálculo da taxa de deposição, energia de soldagem, taxa de fusão e Rendimento econômico do processo GMAW com 307 automatizado	40
Tabela 15 - Dados para cálculo da taxa de deposição, energia de soldagem, taxa de fusão e Rendimento econômico do processo GMAW com 307 manual	40
Tabela 16 - Dados para cálculo da taxa de deposição, energia de soldagem, taxa de fusão e Rendimento econômico do processo GMAW com 309 L manual	40
Tabela 17 - Dados para cálculo da taxa de deposição, energia de soldagem, taxa de fusão e Rendimento econômico do processo GMAW com 309 L automatizado.....	41
Tabela 18 - Dados para cálculo da taxa de deposição, energia de soldagem, taxa de fusão e Rendimento econômico do processo GMAW com 309 L automatizado e adição de Nb.....	41
Tabela 19 - Geometria do cordão de solda (levantamento de parâmetros).....	49

Tabela 20 - Geometria do cordão de solda(réplicas), Processo SMAW	49
Tabela 21 - Geometria do cordão de solda (réplicas), Processo GMAW automatizado com 307	50
Tabela 22 - Geometria do cordão de solda (réplicas), Processo GMAW manual com 307	50
Tabela 23 - Geometria do cordão de solda (réplicas), Processo GMAW manual com 309 L .	50
Tabela 24 - Geometria do cordão de solda (réplicas), Processo GMAW automatizado com 309 L	50
Tabela 25 - Geometria do cordão de solda (réplicas), Processo GMAW automatizado com 309 L e adição de Nióbio	51
Tabela 26 - Estimativas de pesos dos atributos	55
Tabela 27 - Matriz de decisão com as medidas de desempenho dos processos de soldagem..	56
Tabela 28 - Matriz normalizada.....	56
Tabela 29 - Pontuações finais de cada processo de soldagem obtidas pelo método SAW por método de ponderação	56
Tabela 30 - Posições de cada processo de soldagem obtidas pelo método SAW por método de ponderação.....	57
Tabela 31 - Atributos e objetivos.....	63
Tabela 32 - Médias dos atributos.....	63
Tabela 33 - Matriz de decisão dos atributos.....	63
Tabela 34 - Matriz normatizada e ponderada	63
Tabela 35 - Prioridade relativa	64

LISTA DE QUADROS

Quadro 1 - Processos a serem avaliados	28
Quadro 2 - Processos e suas respectivas réplicas	28
Quadro 3 - Atributos de interesse dos processos de soldagem em aço inoxidável para o material do eixo naval	34
Quadro 4 - Teste de comparação múltipla de Conover and Iman. Taxa de Deposição	42
Quadro 5 - Teste de comparação múltipla de Conover and Iman. Energia de Soldagem.....	44
Quadro 6 - Teste de comparação múltipla de Conover and Iman. Rendimento Econômico ...	46
Quadro 7 - Teste de comparação múltipla de Conover and Iman. Microdureza.....	62

LISTA DE GRÁFICOS

Gráfico 1 - Distribuição de dados da Taxa de Deposição	43
Gráfico 2 - Distribuição de dados da Energia de Soldagem.....	44
Gráfico 3 - Distribuição de dados da Energia de Soldagem.....	46
Gráfico 4 - Teste de Tukey para o Rendimento Econômico	46
Gráfico 5 - Teste de Tukey para relação reforço/largura	51
Gráfico 6 - Distribuição de dados da Relação Reforço/Largura	51
Gráfico 7 - Teste de Tukey para Diluição	54
Gráfico 8 - Ordem de importância dos processos de soldagem em relação aos atributos	64

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

ABNT	Associação Brasileira de Normas Técnicas
AISI	American Iron and Steel Institute
ASTM	American Society Testing Materials
AWS	American Welding Society
BSE	Backscattering Electron- Elétrons Retroespalhados
COPRAS	Avaliação Proporcional Complexa
CP	Corpo de Prova
E	Energia de Soldagem
EDS	Espectroscopia por Dispersão de Energia de Rios X
GMAW	Gas Metal Arc Welding
I	Corrente
ISO	International Organization for Standardization
Lcs	Largura do Cordão de Solda
LP	Líquido Penetrante
MAG	Metal Active Gas
MEf	Massa do Eletrodo fundido
MEV	Microscópio Eletrônico de Varredura
Mi	Massa inicial do Corpo de Prova
Mf	Massa final do Corpo de Prova
MIG	Metal Inert Gas
MB	Metal de Base
MCDM	Multiple Criteria Decision Analysis
Nb	Nióbio
Pe	Penetração
R	Rendimento Econômico
SE	Secondary Electron- Eletróns Secundáriod
SMAW	Shielded Metal Arc Welding
TD	Taxa de Deposição
Ts	Tempo de Soldagem
Tf	Taxa de Fusão
V	Tensão
Vs	Velocidade de Soldagem
ZTA	Zona Termicamente Afetada

SUMÁRIO

1 INTRODUÇÃO	19
1.1 JUSTIFICATIVA.....	19
1.2 PROBLEMA.....	19
1.3 OBJETIVOS	20
1.3.1 Objetivo geral.....	20
1.3.2 Objetivos específicos.....	20
2 FUNDAMENTOS TEÓRICOS	21
2.1 PROCESSOS DE SOLDAGEM (SMAW E GMAW)	21
2.2 TAXA DE DEPOSIÇÃO.....	22
2.3 ENERGIA DE SOLDAGEM	23
2.4 RENDIMENTO ECÔNOMICO	23
2.5 GEOMETRIA DO CORDÃO DE SOLDA	23
2.6 MICROGRAFIA.....	24
2.7 MICROSCOPIA ELETRÔNICA DE VARREDURA-MEV	25
2.8 MÉTODO MULTIATRIBUTO DE TOMADA DE DECISÃO	26
2.9 ANÁLISE ESTATÍSTICA - ANOVA.....	27
2.10 AVALIAÇÃO PROPORCIONAL COMPLEXA - COPRAS	27
3 MATERIAIS E MÉTODOS	27
3.1 FONTE ELETRÔNICA	28
3.2 PROCESSOS DE SOLDAGEM COM SEUS RESPECTIVOS CORPOS DE PROVA ..	28
3.3 BALANÇA.....	29
3.4 ENSAIO NÃO DESTRUTIVO	29
3.5 GASES DE PROTEÇÃO	29
3.6 ADIÇÃO DE NIÓBIO	29
3.7 RÉPLICAS	29
3.8 METAL DE BASE E METAIS DE ADIÇÃO	30
3.8.2 Metal de Base.....	30
3.8.2 Metal de Adição Eletrodo Revestido 309 L	30
3.8.3 Arame ER 307.....	30
3.8.4 Arame 309 L	31
3.9 EQUIPAMENTOS PARA ANÁLISE MACRO E MICROESTRUTURAL	31
3.9.1 Cutoff.....	31

3.9.2 Embutidora	31
3.9.3 Politriz	31
3.9.4 Microdurômetro	31
3.9.5 Microscópio Eletrônico de Varredura (MEV)	31
3.10 MÉTODO MUTICRITÉRIOS DE TOMADAS DE DECISÃO (MCDM)	32
3.11 MÉTODOS	32
4 RESULTADOS E DISCUSSÕES	38
4.4 GEOMETRIA DOS CORDÕES DE SOLDA	47
4.4.1 Perfis macrográficos.....	47
5 CONCLUSÕES	70
REFERÊNCIAS.....	72

1 INTRODUÇÃO

1.1 JUSTIFICATIVA

O desenvolvimento do tema abordado neste trabalho visa indicar soluções que minimizem problemas relacionados ao processo de soldagem que será utilizado para retificação de eixos propulsores, SMAW ou GMAW (com e sem adição de Nióbio), além de suas ramificações (automatizado e manual), para uma larga produção, bem como analisar e comparar o comportamento mecânico do material utilizado. Devido à ausência de literatura, principalmente sobre o processo GMAW com adição de Nióbio, para o levantamento de parâmetros, os Métodos Multicritérios de Tomada de Decisão (MCDM) podem ser ferramentas de assistência apropriadas, uma vez que apoiam a escolha da melhor alternativa quando diversos atributos, por vezes conflitantes, são considerados simultaneamente (STATNIKOV; MATUSOV; STATNIKOV, 2012). Nas réplicas, o Teste de Pressupostos da ANOVA (Shapiro-Wilk) e o Teste de Van Der Waerden (Comparação Múltiplas de Conover and Iman) ratificam o MCDM.

Figura 1 - Eixo Propulsoe revestido pelo processo SMAW



Fonte: Próprio autor (2018).

1.2 PROBLEMA

O Processo de soldagem GMAW será mais eficiente em relação ao processo SMAW?

1.3 OBJETIVOS

1.3.1 Objetivo geral

Avaliar qual o melhor processo de soldagem, SMAW ou GMAW, para fabricação de revestimentos em eixos propulsores.

1.3.2 Objetivos específicos

Para a elaboração desse trabalho, os seguintes objetivos foram traçados:

- Realizar o levantamento de parâmetros e confeccionar corpos de prova com os processos de soldagem SMAW e GMAW com suas respectivas ramificações;
- Verificar a geometria e a microestrutura do cordão de solda e da ZTA (zona termicamente afetada);
- Avaliar a resistência mecânica do revestimento com ensaio de microdureza;
- Utilizar o Método Multicritério de Tomada de Decisão (MCDM) para dar suporte em relação à decisão entre vários atributos utilizados nos processos de soldagem para o levantamento de parâmetros;
- Analisar, através da imagem do Microscópio Eletrônico de Varredura-MEV, como o Nióbio ficou distribuído no metal de solda.

2 FUNDAMENTOS TEÓRICOS

2.1 PROCESSOS DE SOLDAGEM (SMAW E GMAW)

A soldagem com eletrodos revestidos (SMAW) obtém a união das peças pelo seu aquecimento localizado com um arco elétrico estabelecido entre um eletrodo metálico consumível, recoberto com um fluxo, e as peças (Figura 2). Segundo Modenesi (2012), o revestimento é consumido junto com o eletrodo pelo calor do arco, desempenhando uma série de funções fundamentais ao processo de soldagem como a estabilização do arco, a proteção do metal fundido pela formação de escória e de gases e a adição de elementos de liga e de desoxidantes à poça de fusão.



Fonte: Modenesi (2012).

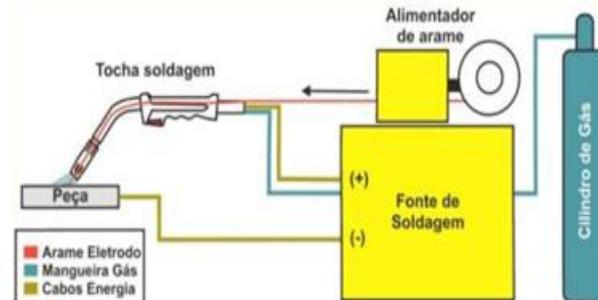
O processo de soldagem a arco MIG/MAG ou GMAW (Figura 3) baseia-se na formação de um arco voltaico entre a peça de trabalho e um eletrodo nu maciço consumível, com contínua alimentação. A proteção do arco e da região da solda contra contaminação pela atmosfera é feita por um gás ou mistura de gases supridos com pressão e vazão adequadas (MACHADO, 1996; ZIELINSKA, 2008; PLANCKAERT, 2009).

Os processos de soldagem com proteção gasosa tiveram início na década de 20. Foi nesta época que surgiu a concepção básica do GMAW, entretanto este somente se tornou comercial após 1948. Inicialmente, foi considerado um processo de alta densidade de corrente, pequenos diâmetros de eletrodos de metal nu onde se utiliza um gás inerte para proteção. Sua primeira aplicação foi na soldagem de alumínio. Por causa dessa característica, o processo era conhecido como Metal Inert Gas – MIG, denominação ainda utilizada para o processo. A evolução subsequente do processo incluiu a soldagem com baixas densidades de corrente e corrente pulsada, aplicação em uma vasta faixa de materiais e emprego de gás ativo ou uma mistura de gases. Este último desenvolvimento levou à aceitação formal do termo

GMAW (Gas Metal Arc Welding) para denominação do processo, devido aos gases inertes e ativos utilizados (BARBEDO, 2011).

Na soldagem GMAW, a tocha deve estar totalmente alinhada para juntas em ângulo, pois um pequeno desalinhamento pode causar falta de fusão lateral (ARAUJO, 2004).

Figura 3 - Esquema representativo da soldagem GMAW



Fonte: Cabral (2008).

2.2 TAXA DE DEPOSIÇÃO

De acordo com Modenesi (2001), a taxa de deposição (Equação 1), isto é, a quantidade de material depositado por unidade de tempo depende de vários fatores, incluindo o processo de soldagem, o tipo, o diâmetro e o comprimento do eletrodo, a polaridade e o nível da corrente. Nascimento (2011) explica que, para minimizar as perdas (evaporação, respingos, etc) e aumentar o rendimento de deposição, depende-se de uma regulagem correta dos parâmetros específicos.

Também está relacionada ao comprimento energizado do arame tubular (eletrodo) ou *stickout*, sendo esta definida como a distância entre a extremidade do bico de contato da tocha e a extremidade do arame em contato com o arco (MARQUES; MODENESI; BRACARENSE, 2007).

Segundo Nascimento (2011), não se deve confundir taxa de fusão com taxa de deposição, ou seja, consumo e produção, respectivamente. Nem todo material que se funde do arame-eletrodo vai para região da junta, pois durante o processo há evaporação e principalmente perdas por respingo.

$$TD = \frac{PF - PI}{t} \quad (1)$$

2.3 ENERGIA DE SOLDAGEM

Verificando a possibilidade de diminuir a deformação é observado a Teoria de Energia de Soldagem conforme Equação 2 (ASSUNÇÃO, 2013).

Em aços inoxidáveis Duplex e Superduplex, a energia de soldagem elevada tende a produzir uma velocidade de resfriamento menor na junta, assim pode favorecer a precipitação de fases intermetálicas e o crescimento de grãos. Em consequência, a precipitação da austenita torna-se favorável, no entanto, com uma energia de soldagem menor tende a uma velocidade de resfriamento maior, neste caso ocorre precipitação de nitretos de cromo na ferrita. Em ambos os casos, ocorre severa diminuição na tenacidade e na resistência à corrosão do material, portanto os autores em geral sugerem energia de soldagem menores (DE SOUZA; PATRÍCIA, 2009).

$$E = \frac{(\eta * I * V)}{V_s} \quad (2)$$

2.4 RENDIMENTO ECÔNOMICO

Rendimento econômico é definido como a relação (em porcentagem) entre as taxas de deposição e de fusão conforme Equação 3. Se o eletrodo não possuir adições metálicas em seu revestimento, este parâmetro indica a proporção da alma que foi utilizada na formação da solda (MODENESI, 2007).

Para Dobignies (2008), um estudo sobre soldagem MIIG/MAG por curto-circuito forçado obteve rendimentos econômicos acima de 90 %, os resultados de Kobayashy (2002) ficaram entre 96 a 99%.

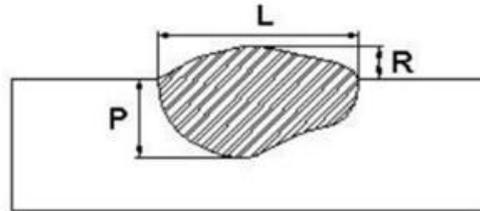
$$R = \frac{TD}{Tf} 100 \quad (3)$$

2.5 GEOMETRIA DO CORDÃO DE SOLDA

A avaliação da geometria da superfície plana do cordão de solda é realizada pela análise dimensional de sua seção transversal. Para o mesmo material e tipo de junta, a natureza do consumível, a corrente de soldagem, o comprimento do eletrodo, a tensão e a velocidade de soldagem interferem na geometria da solda. A geometria do cordão de solda tem influência básica na resistência mecânica da junta soldada. O esquema representativo do perfil geométrico do cordão de solda está presente na Figura 4 e nela estão indicadas as

principais grandezas que caracterizam a geometria do cordão de solda: a penetração (P), o reforço (R) e a largura (L) (BRAGA, 2008).

Figura 4 - Representação das grandezas geométricas do cordão de solda



Fonte: Assunção (2013).

A análise da geometria da solda é realizada pela avaliação dimensional da seção transversal da Figura 4. As medidas de largura (L), reforço (R) e penetração (P) definem tais características geométricas do cordão de solda depositado na superfície das peças metálicas. A composição química final da zona fundida depende da intensidade nas interações das composições químicas do metal de base e da adição e da participação relativa destes na formação da zona fundida. Esta participação relativa é conhecida como “coeficiente de diluição” ou simplesmente pode ser expressa pela Equação 5, onde “diluição” (δ), “A” e “B” são as áreas formadas na junta soldada (BRAGA 2008).

$$\delta = \frac{B}{B + A} 100 \quad (5)$$

A principal diferença da soldagem de revestimento em relação às aplicações convencionais de soldagem trata-se da geometria do cordão de solda. Ao contrário das aplicações convencionais, em que é desejável alta penetração para garantir a resistência da junta soldada, na soldagem de revestimento o perfil geométrico desejado se resume a grandes larguras do cordão, altos reforços, baixas penetrações e baixos percentuais de diluição (DE SOUZA; PARANHOS, 2014).

2.6 MICROGRAFIA

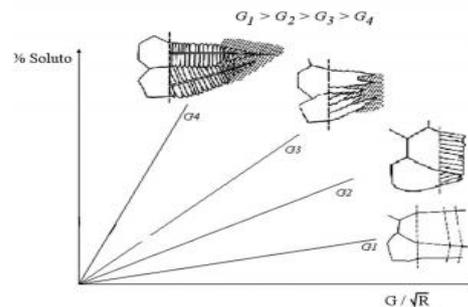
Segundo Oslon (1983), a estrutura de solidificação da Zona Fundida é controlada pelo super-resfriamento, que depende do índice de temperatura, velocidade de solidificação e porcentagem de soluto na fase sólida e líquida. O índice de temperatura (G) é a diferença de temperatura no líquido em relação à distância, a partir da área de interação sólido/líquido. A velocidade de solidificação (R) está relacionada ao avanço da área de interação sólido-líquido e esta, por sua vez, depende da diferença da temperatura líquidas.

Diferentes modos de solidificação podem ocorrer na Zona Fundida, tais como: planar, celular, celular dendrítico, colunar dendrítico e dendrítico equiaxial. Na Figura 5 estão representadas esquematicamente as várias estruturas de crescimento em relação ao índice de temperatura imposto no resfriamento (G) e a velocidade de avanço da interface sólido-líquido (R) (DAS NEVES, 2009).

Conforme David (1997), valores baixos de R e elevados de G , como ocorre no início da solidificação, favorecem uma estrutura de solidificação planar à frente da interface S-L. Conforme a frente avança na direção do centro da Zona Fundida, o valor de R se eleva rapidamente, resultando numa transição de estrutura planar para celular ou dendrítica.

Utiliza-se a relação G/\sqrt{R} , mostrada na Figura 5, para estudar o modo de solidificação. Um valor baixo desta relação significa que o líquido está super-resfriado e o crescimento dendrítico da interface é estável para uma determinada porcentagem de soluto. Por outro lado, para valores elevados, o líquido não está super-resfriado e favorece o crescimento planar da interface (DAS NEVES, 2009).

Figura 5 - Diagrama esquemático dos diferentes modos de solidificação para relação G/\sqrt{R}



Fonte: Das Neves (2009).

2.7 MICROSCOPIA ELETRÔNICA DE VARREDURA-MEV

Dedavid, Gomes e Machado (2007) explicam que a fonte de luz branca é um problema relacionado ao microscópio óptico convencional, o MEV utiliza feixe de electrons no lugar de fótons, o que ajuda a solucionar esse problema.

Os elétrons secundários (secondary electron- SE) são resultado do feixe de elétrons com o material da amostra. Esses electrons são de baixa energia e oferecem imagens de alta resolução, as imagens SE são dadas pelo relevo da amostra, que é o princípio de formação das imagens do MEV.

Elétrons Retroespalhados (backscattering electron- BSE) produzem uma imagem mais topográfica do relevo da amostra, contudo as imagens BSE são imagens de revelação, pois

podem revelar os elementos químicos contidos nas amostras através do número atômico (DEDAVID; GOMES; MACHADO, 2007).

2.8 MÉTODO MULTIATRIBUTO DE TOMADA DE DECISÃO

O processo decisório pode ser uma atividade complexa quando há diversas exigências a serem satisfeitas. No campo da engenharia, a maioria dos problemas são essencialmente multicritérios por envolverem vários objetivos (STATNIKOV; MATUSOV; STATNIKOV, 2012).

Tal complexidade pode ser verificada quando se comparam alternativas de processos de soldagem como os de revestimentos destinados a reparos de eixos propulsores navais pela existência de várias propriedades que devem ser comparadas, podendo ocorrer que algum processo demonstre desempenho vantajoso em determinados aspectos, mas não em outros.

Nesse contexto, os Métodos Multicritérios de Tomada de Decisão (MCDM) podem ser ferramentas de assistência apropriadas, uma vez que apoiam a escolha da melhor alternativa quando diversos atributos, por vezes conflitantes, são considerados simultaneamente (HWANG; YOON, 1981).

Os problemas de engenharia aos quais vêm sendo aplicados os MCDM são diversificados. Por exemplo, na seleção de materiais (JAHAN et al., 2011), no planejamento de experimento e otimização (BISWAS et al., 2009), na manutenção (SHYJITH; ILANGKUMARAN; KUMANAN, 2008), em projetos (VAIDOGAS; ZAVADSKAS; TURSKIS, 2007), processos produtivos (CAPRAZ et al., 2015) e na análise de sistemas de custos (CAPRACE; RIGO, 2009).

Yoon e Hwang (1981) explicam que os MCDM envolvem as seguintes etapas:

- (a) determinação das alternativas a disposição do tomador de decisão e os atributos;
- (b) determinação dos atributos, também denominados critérios ou objetivos, que são as características que descrevem as qualidades das alternativas;
- (c) atribuição dos pesos aos atributos;
- (d) cálculos de pontuação, realizados por um modelo escolhido conforme as peculiaridades do problema;
- (e) ordenação das alternativas.

Os pesos dos atributos devem refletir as preferências do decisor, normalmente a somatória dos diversos pesos totalizam um, o que corresponde a 100% da importância dos objetivos em análise. Há muitas maneiras de designar tais pesos, desde a informação de

números pontuais subjetiva e diretamente fornecida, até em forma de intervalos simples ou com apoio de lógica fuzzy (HWANG; YOON, 2012; ROSZKOWSKA, 2013; BUEDE; MILLER, 2016; JAHAN; EDWARDS; BAHRAMINASAB, 2016). Todavia, pode ocorrer que, a princípio, o decisor não se sinta seguro de atribuir valores, mas saiba claramente a ordem de prioridade dos atributos para a aplicação em foco. Nesses casos, podem se empregar técnicas de cálculo dos pesos com base na informação contida na ordenação.

Os métodos de atribuição de pesos baseados em ordenações são os mais simples, visto que exigem somente que os tomadores de decisão organizem os atributos por ordem de importância.

2.9. ANÁLISE ESTATÍSTICA - ANOVA

A ANOVA, segundo Hines et al. (2006), é um teste paramétrico que exige o atendimento de três pressupostos, erros normalmente distribuídos, homogeneidade das variâncias (homocedasticidade) e aleatorização.

A verificação do pressuposto de normalidade foi realizado pelo teste Shapiro-Wilk (W) que testa a hipótese nula de que a distribuição é normalmente distribuída. Fávero et al. (2009) descrevem Shapiro-Wilk como um dos testes mais poderosos de normalidade principalmente para pequenas amostras. Para verificação da hipótese de nula de homogeneidade das variâncias, utilizou-se o teste de Levene, conforme sugestão de Hines et al. (2006). A aleatorização foi garantida com o procedimento experimental.

2.10 AVALIAÇÃO PROPORCIONAL COMPLEXA - COPRAS

Para avaliar os processos de soldagem considerando conjuntamente as suas características, aplicou-se a Avaliação Proporcional Complexa (Complex Proportional Assessment – COPRAS) proposta por Zavadskas e Kaklauskas (1996), um método de avaliação multiatributo que se destaca pela simplicidade de seus cálculos.

3 MATERIAIS E MÉTODOS

Neste capítulo serão apresentados os materiais, equipamentos e metodologia utilizados para a elaboração desse trabalho.

3.1 FONTE ELETRÔNICA

Foi utilizada uma fonte eletrônica Digiplus para os dois processos (SMAW e GMAW), modelo A7 de 400 A, 280A a 100% e alimentador de arame, modelo STA-20D da IMC, fonte tipo multiprocessos, tensão em vazio de 50V, corrente máxima de 400A e tensão máxima de 85V (Figura 6).

Figura 6 - Fonte de Soldagem



Fonte: manualzz.com

3.2 PROCESSOS DE SOLDAGEM COM SEUS RESPECTIVOS CORPOS DE PROVA

Para o levantamento de parâmetros, os processos de soldagem com seus respectivos metais de adição tiveram suas ramificações para melhor visualização dos resultados conforme Quadro 1.

Quadro 1 - Processos a serem avaliados

I	Processo	Código
1	SMAW (AWS E 309 L)	SMAW
2	GMAW automatizado AWS AR 307	GMAW 1
3	GMAW manual AWS AR 307	GMAW 2
4	GMAW manual AWS AR 309 L	GMAW 3
5	GMAW automatizado AWS AR 309 L	GMAW 4
6	GMAW automatizado AWS AR 309 L com adição de nióbio	GMAW 5

Fonte: Próprio autor (2019).

As réplicas foram confeccionadas de acordo com o Quadro 1 e seguem conforme o Quadro 2.

Quadro 2 - Processos e suas respectivas réplicas

I	Processo	Corpos de Prova
1	SMAW (AWS E 309 L)	0, 18, 23, 8 e 5
2	GMAW automatizado AWS AR 307	7, 3, 1, 14 e 20
3	GMAW manual AWS AR 307	10, 12, 6, 4 e 17
4	GMAW manual AWS AR 309 L	13, 22, 9, 2 e 11
5	GMAW automatizado AWS AR 309 L	27, 19, 25, 21 e 16
6	GMAW automatizado AWS AR 309 L com adição de nióbio	28, 24, 15, 26 e 29

Fonte: Próprio autor (2019).

3.3 BALANÇA

Foi utilizada uma balança do fabricante GEHAKA, modelo BG 1000, de capacidade de 1Kg para mensurar as massas dos corpos de prova antes e pós soldagem, a massa dos metais de adição, bem como a massa da fita de Nióbio.

3.4 ENSAIO NÃO DESTRUTIVO

O Ensaio por Líquido Penetrante (LP) foi realizado no laboratório de materiais da Faculdade de Engenharia Mecânica da Universidade Federal do Pará. O ensaio de LP seguiu as etapas conforme as recomendações da Norma ABNT NM 327.

3.5 GASES DE PROTEÇÃO

Os gases de proteção utilizados foram o Argônio com 5% de oxigênio (O) e 5% de Dióxido de Carbono (CO₂) e uma vazão de 15 l/min.

3.6 ADIÇÃO DE NIÓBIO

O Nióbio foi adicionado manualmente, ou seja, foi fundida fita de Nb juntamente com o metal de solda, onde para cada corpo de prova foi medida a massa inicial e a massa final de cada fita, assim podendo mensurar a quantidade incrementada em cada corpo de prova.

O método utilizado para medir as durezas das regiões que compõe a junta soldada Metal de Base, Zona Termicamente Afetada e Zona Fundida (MB, ZTA, ZF) seguirá os termos da Norma ASTM E384-16.

3.7 RÉPLICAS

Para a confecção das réplicas, foi utilizado o processo de sorteio, ou seja, os corpos de provas foram marcados com números de 0 a 29, onde integrantes do laboratório de

mecânica da Universidade Federal do Pará foi sorteando sequentemente cada processo de soldagem a ser utilizado para o devido corpo de prova, assim foram soldados 5 corpos de prova para cada processo com sua ramificação, totalizando 30 corpos de prova.

3.8 METAL DE BASE E METAIS DE ADIÇÃO

3.8.1 Metal de Base

O metal de base utilizado foi o aço inoxidável AISI 316 L, cuja composição química encontra-se exposta na Tabela 1.

Tabela 1 - Composição química do Aço Inoxidável 316L

C máx.	Mn máx.	Si máx.	P máx.	S máx.	Cr	Ni	Mo	N ₂ máx.
0,03	2,00	1,00	0,045	0,030	16,00 a 18,00	10,00 a 14,00	2,00 a 3,00	0,10

Fonte: <https://www.google.com/search.composição+açoinoxidável316L>.

3.8.2 Metal de Adição Eletrodo Revestido 309 L

O metal de adição utilizado para o processo SMAW foi o AWS E309 L, o qual possui elevado teor de liga, destinado à soldagem de aços dissimilares e inoxidáveis com composições similares, também possui excelentes características operacionais em todas as posições, exceto na vertical descendente, bem como atende aos requisitos da classificação E309-17. Foi utilizado o eletrodo de 3,25 mm, cuja composição química está exposta na Tabela 2.

Tabela 2 - Composição química do Eletrodo 309 L

Mn	Mo	C	Si	Ni	Cr
1.03 %	0.19 %	0.03 %	0.85 %	12.26 %	23.66 %

Fonte: Catálogo de fabricante.

3.8.3 Arame ER 307

Especial para a soldagem de aços de soldabilidade restrita, como aços baixa liga e sem liga (beneficiáveis), aços resistentes ao calor, aços inoxidáveis, dissimilares, aço com 14% Mn (ESAB). Foi utilizado o arame de 1,2 mm e sua composição química está exposta na Tabela 3.

Tabela 3 - Composição química do arame ER 307

C	Cr	Ni	Mo	Si	Mn	P	S	Cu
0.09	18.9	8.5	0.25	0.8	6.90	0.02	0.01	0.17

Fonte: Catálogo de fabricante.

3.8.4 Arame 309 L

Arame cromo-níquel resistente à corrosão para soldagem aços similares, aços forjados e fundidos do tipo 23%Cr-12%Ni. A liga é também usada para soldagem de camadas de amanteigamento em aços CMn e soldagem de juntas dissimilares. Ao usar o arame para camadas de amanteigamento e juntas dissimilares, é necessário controlar a diluição da solda. Foi utilizado o arame de 1,2 mm cuja composição química está exposta na Tabela 4.

Tabela 4 - Composição química do arame ER 309 L

Mn	C	Si	Ni	Cr
1.8 %	<0,03 %	0.8 %	13 %	24 %

Fonte: Catálogo de fabricante.

3.9 EQUIPAMENTOS PARA ANÁLISE MACRO E MICROESTRUTURAL

3.9.1 Cutoff

Para seccionar os corpos de prova, foi utilizado uma cortadora metalográfica da marca Arotec, modelo Arocor 60.

3.9.2 Embutidora

O embutimento das peças foram feitos em baquelite na embutidora da marca Teglogo e modelo EM30D.

3.9.3 Politriz

A politriz utilizada para lixar os corpos de prova foi a do fabricante Teclago, modelo PL 01.

3.9.4 Microdurômetro

Para a análise de microdureza foi utilizado o Microdurômetro do fabricante Mitutoyo e modelo HM-101.

3.9.5 Microscópio Eletrônico de Varredura (MEV)

Para imagens EDS, SE e BSE, foi utilizado o MEV do fabricante TESCAN, modelo VEGA3.

3.10 MÉTODO MUTICRITÉRIOS DE TOMADAS DE DECISÃO (MCDM)

Para o MCDM, as informações a respeito da prioridade das propriedades foram fornecidas por um engenheiro mecânico com mais de 10 anos de experiência profissional. Diante de uma lista pré-elaborada que lhe foi apresentada, foi solicitado que as ordenasse da mais importante a menos importante, podendo haver empates, considerando que se destinavam à avaliação de processos de soldagem para reparo de eixo propulsor naval de aço inoxidável AISI 316L.

3.11 MÉTODOS

Para o levantamento de parâmetros, foram soldados 6 corpos de provas, conforme Quadro 1. Para um maior campo amostral/estatístico, foram confeccionados 30 corpos de prova conforme descrito no item 3.8 desse trabalho. Os valores preliminares de corrente, tensão, velocidade de soldagem e massa de Nióbio depositado estão expostos na Tabela 5 e serviram de base para a soldagem das réplicas.

Tabela 5 - Processos de soldagem com os respectivos metais de adição e parâmetros

CP	Processos	Ts	I	V	Vs	Nb
1	SMAW (AWS E309L)	17	160	36,5	31,4	X
2	GMAW AUTOMATIZADO (AWS AR 307)	9	290	31	50	X
3	GMAW MANUAL (AWS AR 307)	24	228	26,3	25	X
4	GMAW MANUAL (AWS AR 309 L)	18	223	26	32	X
5	GMAW AUTOMATIZADO (AWS AR 309 L)	10	284	31	50	X
6	GMAW AUTOMATIZADO (AWS AR 309 L) COM ADIÇÃO DE NIÓBIO	10	286	31	50	1,2

Fonte: Próprio autor.

Nota: Ts = Tempo de soldagem (s), I = Corrente (A), V= Tensão(V); Vs = Velocidade de Soldagem (s), Nb =Massa de Nióbio depositado (g).

Para comparação, seguem Tabelas 6 a 11 das réplicas:

Tabela 6 - Processo de soldagem SMAW AWS E 309 L com os respectivos corpos de prova e parâmetros

CP	Ts	I	V	Vs
0	19,8	160	36,5	29,69
18	14,57	160	36	35,83
23	20,95	160	36,4	25,14
8	25,38	160	36,6	24,04
5	20,51	160	36	25,88

Fonte: Próprio autor.

Nota: Ts = Tempo de soldagem (s), I = Corrente (A), V= Tensão(V); Vs = Velocidade de Soldagem (s).

Tabela 7 - Processos de soldagem GMAW automatizado AWS AR 307 com os respectivos corpos de prova e parâmetros

CP	Ts	I	V	Vs
7	11,82	266	31,0	50
3	11,16	266	31,1	50
1	12,01	264	31,0	50
14	11,29	268	31,0	50
20	12,01	268	31,1	50

Fonte: Próprio autor.

Nota: Ts = Tempo de soldagem (s), I = Corrente (A), V= Tensão(V); Vs = Velocidade de Soldagem (s).

Tabela 8 - Processos de soldagem GMAW manual AWS AR 307 com os respectivos corpos de prova e parâmetros

CP	Ts	I	V	Vs
10	22,79	198	26,1	23,95
12	25,61	199	26,2	23,66
6	24,29	197	26,0	25,19
4	28,95	193	26,0	21,13
17	21,56	191	26,9	21,98

Fonte: Próprio autor.

Nota: Ts = Tempo de soldagem (s), I = Corrente (A), V= Tensão(V); Vs = Velocidade de Soldagem (s).

Tabela 9 - Processos de soldagem GMAW manual AWS AR 309 L com os respectivos corpos de prova e parâmetros

CP	Ts	I	V	Vs
13	28,9	179	26,2	18,89
22	24,88	188	26,0	24,35
9	25,19	186	26,4	24,29
2	21,61	189	26,4	28,32
11	18,49	192	26,4	25,63

Fonte: Próprio autor.

Nota: Ts = Tempo de soldagem (s), I = Corrente (A), V= Tensão(V); Vs = Velocidade de Soldagem (s).

Tabela 10 - Processos de soldagem GMAW automatizado AWS AR 309 L com os respectivos corpos de prova e parâmetros

CP	Ts	I	V	Vs
27	11,84	262	31,3	50
19	11,46	262	31,3	50
25	10,98	271	31,0	50
21	11,94	269	31,7	50
16	11,30	273	31,0	50

Fonte: Próprio autor.

Nota: Ts = Tempo de soldagem (s), I = Corrente (A), V= Tensão(V); Vs = Velocidade de Soldagem (s).

Tabela 11 - Processos de soldagem GMAW automatizado AWS AR 309 L (adição de Nióbio) com os respectivos corpos de prova e parâmetros

CP	Ts	I	V	Vs	Nb
28	12,73	276	31	50	1,0
24	10,66	274	31	50	1,1
15	11,18	275	31	50	1,4
26	9,27	275	31	50	0,2
29	16,51	284	31	50	1,2

Fonte: Próprio autor.

Nota: Ts = Tempo de soldagem (s), I = Corrente (A), V= Tensão(V); Vs = Velocidade de Soldagem (s), Nb =Massa de Nióbio depositado (g).

Para o levantamento de indicativos, os dois processos de soldagem (SMAW e GMAW) com suas ramificações - automatizado, manual e automatizado com adição de Nióbio (Nb) - serviram de base. Para isso seis corpos de prova foram confeccionados, e conforme parâmetros estabelecidos, foi calculada e de deposição (TD), Energia de soldagem (E), Rendimento econômico (E), exposta a Taxa Diluição (δ) e Relação reforço-largura (Re/Lcs). As propriedades destinadas à comparação de processos foram as tradicionalmente encontradas na literatura, as quais são elencadas no Quadro 3.

Quadro 3 - Atributos de interesse dos processos de soldagem em aço inoxidável para o material do eixo naval

Atributos	Objetivo	Medida
Taxa de deposição (TD)	Max	kg/h
Energia de soldagem (E)	Min	J/mm
Rendimento econômico (R)	Max	Proporção
Diluição (δ)	Min	Taxa
Relação reforço-largura (Re/Lcs)	Min	Taxa

Fonte: Próprio autor.

Neste trabalho, foram aplicados seis métodos de atribuição de pesos que utilizam exclusivamente a ordem de prioridade informada pelo decisor, os quais são descritos a seguir.

O método que requer o menor conhecimento das preferências é de ponderação igual (*equal weights – EW*), segundo o qual os pesos são igualmente distribuídos conforme Equação 6 a seguir:

$$EW_j = \frac{1}{n} \quad (6)$$

O método de ordenação recíproca (*rank reciprocal weights - RR*) utiliza as inversas das ordens dos atributos normalizados para cálculo dos respectivos pesos.

$$RR_j = \frac{\frac{1}{r_j}}{\sum_{k=1}^n \frac{1}{r_j}} \quad (7)$$

Onde RR_j e r_j são respectivamente o peso e a posição do atributo j , $j= 1, .2, \dots, n$.

O método da somatória (*rank sum weights - RS*) estima as ponderações por meio da seguinte equação:

$$RS_j = \frac{(n - r_j + 1)}{\sum_{k=1}^n (n - r_j + 1)} \quad (8)$$

Onde n é o total de atributos.

O método de ordenação exponente (*rank exponent weight – RE*) é calculado conforme a seguinte fórmula:

$$RE_j = \frac{(n - r_j + 1)^p}{\sum_{k=1}^n (n - r_j + 1)^p} \quad (9)$$

Onde p é um parâmetro que descreve a distribuição dos pesos entre os atributos e, conforme explica Roszkowska (2013), quanto maior o valor de p , mais concentrado será o valor dos pesos em torno dos atributos tidos como mais importantes. O RE é uma generalização dos métodos EW e RS, se $p=0$, RE equivale ao EW, e se $p=1$, equivale ao RS.

O método do centroide (*rank order centroid - ROC*), proposto por Barron e Barrett (1996), estima os pesos que minimizam seus erros máximos a partir do centroide de todos os pesos possíveis, mantendo a ordem de importância dos atributos (CAPRACE; RIGO, 2009), conforme a equação a seguir.

$$ROC = \frac{1}{n} \sum_{k=j}^n \frac{1}{r_k} \quad (10)$$

A título de ilustração, tome-se um atributo na quarta posição de uma lista com o total de 5, seu peso seria $ROC(4) = (0 + 0 + 0 + 1/4 + 1/5)/5 = 0,09$, já o peso daquele que estivesse na quinta posição seria $ROC(5) = (0 + 0 + 0 + 0 + 1/5)/5 = 0,04$, como será exibido adiante.

Para simular o efeito da escolha dos pesos estimados, utilizou-se a Ponderação Aditiva Simples (*Simple Additive Weighting – SAW*) para avaliar os cinco processos de soldagem devido a sua simplicidade e por ser um dos métodos mais utilizados em problemas multicritérios (HWANG; YOON, 1981).

O procedimento de cálculo do SAW inicia com a organização das medidas de desempenho das m alternativas de processo numa matriz de decisão A .

$$A = [x_{ij}]_{m \times n} \quad (11)$$

Onde x_{ij} corresponde ao desempenho, ou utilidade, do processo i associado ao atributo j , $i=1, \dots, m$ e $j=1, \dots, n$.

Normalizam-se as medidas de desempenho conforme o atributo. Caso represente um objetivo ou propriedade que se deseja maximizar, é denominado benefício, sendo normalizado por meio da Equação 12:

$$a_{ij} = \frac{x_{ij}}{x_j^{\max}} \quad (12)$$

Por outro lado, se for um atributo cujo valor se deseja minimizar, denominado custo ou não-benefício, as medidas são normalizadas pela Equação 13:

$$a_{ij} = \frac{x_j^{\min}}{x_{ij}} \quad (13)$$

Onde a_{ij} são as medidas de desempenho x_{ij} normalizadas.

A função de utilidade de cada alternativa é calculada como a soma das medidas de desempenho normalizadas (a_{ij}) ponderadas pelos pesos de seu respectivo atributo (w_j), conforme Equação 14:

$$S_i = \sum_{j=1}^k w_j a_{ij} \quad (14)$$

Quanto maior a valor de S_i , maior a utilidade da alternativa, de modo que as alternativas podem ser ordenadas em ordem decrescente, sendo a preferível aquela com maior pontuação final.

Para a análise estatística das réplicas, os dados foram inicialmente armazenados em planilha eletrônica para posterior análise por meio de gráfico e estatísticas.

No intuito de se verificar se as respostas obtidas nos experimentos com os seis processos de soldagem diferem entre si, formularam-se as seguintes hipóteses:

$$H_0: \mu_1 = \mu_2 = \mu_3 = \mu_4 = \mu_5 = \mu_6$$

H_1 : pelo menos uma diferença entre os processos

Nas quais μ_j representa a média das respostas geradas por cada uma dos seis processos de soldagem. As quais foram testadas pela a Análise de Variância de um fator (Anova) ou Teste de Van der Waerden para k -amostras independentes, com o nível de significância (α) de 5%.

Caso algum dos pressupostos da Anova quanto à normalidade ou homocedasticidade não fosse confirmado, aplicar-se-ia o Teste de Van der Waerden para k -amostras

independentes - um teste não paramétrico alternativo à Anova, conforme explicam Conover e Iman (1979), quando seus pressupostos não são verificados.

No caso da rejeição da H_0 pela Anova, a análise segue para os teste de multicomparações de Tukey para identificação do pares que deram origem às diferenças. Após a rejeição da H_0 pelo Teste de Van der Waerden, utilizou-se o teste multicomparações proposto por Conover e Iman (1979).

As estatísticas foram realizadas com apoio do programa computacional R versão 3.5.3, distribuído gratuitamente, sob os termos da GNU General Public License, no sítio <http://www.r-project.org/>, e de seus pacotes “car” (FOX; WEISBERG, 2011) e “PMCMR” (POHLERT, 2014).

Para a Análise Complexa Proporcional, realizaram-se as seguintes etapas:

1ª etapa: Os atributos devem ser definidos e devem receber pesos (w_j) que reflitam a importância de cada atributo j para a aplicação; no caso deste estudo, para retificação de revestimentos em eixos propulsores. O COPRAS não estabelece o método de atribuição de pesos de modo que utilizou-se uma técnica auxiliar que será adiante descrita.

2ª etapa: As medidas de desempenho são organizadas numa matriz de decisão em que as alternativas são dispostas nas linhas e as respectivas medidas ou atributos em colunas, como a demonstrada a seguir:

$$X = \begin{pmatrix} X_{11} & X_{12} & \dots & X_{1n} \\ X_{21} & X_{22} & \dots & X_{2n} \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ X_{m1} & X_{m2} & \dots & X_{mn} \end{pmatrix}$$

Onde x_{ij} é o desempenho da alternativa i associada ao atributo j , $i=1, \dots, m$ e $j=1, \dots, n$.

3ª etapa: os elementos de X são normalizados pela Equação 15:

$$r_{ij} = \frac{x_{ij}}{\sum_{i=1}^m x_{ij} \dots} \quad (15)$$

Onde r_{ij} é o elemento normalizado da i -ésima alternativa associado ao j -ésimo atributo.

4ª etapa: os elementos já normalizados são então ponderados epla Equação 16:

$$v_{ij} = w_j \times r_{ij} \dots \quad (16)$$

Onde v_{ij} é o elemento normalizado e ponderado da alternativa i pelo peso (w_j) do atributo j .

5ª etapa: Somam-se os dados normalizados dos atributos positivos (S_{+i}) Equação 17 e dos atributos negativos (S_{-i}) Equação 18.

$$S_{+i} = \sum_{i=1}^n V_{+ij} \dots \quad (17)$$

$$S_{-i} = \sum_{i=1}^n V_{-ij} \dots \quad (18)$$

Onde v_{+ij} são os valores dos atributos positivos, aqueles que se deseja maximizar, pois descrevem benefícios, e v_{-ij} , os valores dos atributos negativos, que se deseja minimizar por serem custos ou não-benefícios.

6ª etapa:

$$Q_i = S_{+i} \frac{\sum_{i=1}^n S_{-i}}{S_{-i} \sum_{n=1}^n \frac{1}{S_{-i}}} \quad (19)$$

Onde Q_i é o desempenho global de cada alternativa i . Quanto maior o valor Q_i , mais preferível é a alternativa em análise, considerando as importâncias de cada atributo (Equação 19).

Para atribuição de valores numéricos aos pesos dos atributos, utilizou-se método da somatória (*rank sum weights*) que estima os pesos a partir da informação de sua ordenação (CORRÊA et al., 2017). Por esse método, os atributos são ordenados em ordem decrescente de importância, sendo 1 o mais importante, os pesos são estimados pela Equação (20)

$$W_j = \frac{(n-p_j-1)}{\sum_{k=1}^n (n-p_k-1)} \dots \quad (20)$$

Onde n é o total de atributos e p representa a posição do atributo j na ordenação.

4 RESULTADOS E DISCUSSÕES

O ensaio por Líquido Penetrante apontou que não ocorreram descontinuidades na superfície do material, assim como não apresentou trincas, fissuras ou dobras, qualificando a soldagem quanto aos padrões de aceitação técnicas (Figura 7).

Figura 7 - Ensaio por Líquido Penetrante. CP 23- Processo SMAW; CP 01- GMAW automatizado com 307; CP 12- GMAW manual com 307; CP 09- GMAW manual com 309 L; CP 19- GMAW automatizado com 309 L e CP 26- GMAW automatizado com 309 L e adição de Nióbio



Fonte: Próprio autor.

A Tabela 12 representa os valores de Taxa de Deposição, Energia de Soldagem, Taxa de Fusão e Rendimento Econômico dos primeiros corpos de prova para o levantamento de parâmetros deste trabalho.

Tabela 12 - Resultados da Taxa de deposição, Energia de soldagem, Taxa de fusão e Rendimento econômico

CP	TD	E	Tf	R
1	0,47	167,38	0,46	101,26
2	1,84	170,81	1,45	127,20
3	0,86	227,86	0,87	99,61
4	0,86	172,12	0,87	99,61
5	1,65	167,27	1,41	116,47
6	1,58	168,45	1,41	111,52

Fonte: Próprio autor.

Nota: CP=Corpo de prova; TD=Taxa de deposição (g/s); E=Energia de soldagem (J/min); Tf=Taxa de fusão (g/s); R=Rendimento econômico (%).

As Tabelas 13 a 18 representam os dados utilizados para cálculo da Taxa de Deposição, Energia de Soldagem, Taxa de Fusão e Rendimento Econômico das réplicas dos processos exposto nesse trabalho para melhor distribuição dos resultados e comparação com os valores do levantamento de parâmetros.

Tabela 13 - Dados para cálculo da taxa de deposição, energia de soldagem, taxa de fusão e Rendimento econômico do processo SMAW

CP	M _i	M _f	C	ME _f	TD	E	Tf	R
0	228,0	237	9,8	9,2	0,45	176,98	0,46	97,82
18	225,7	233,1	8,6	7,9	0,50	144,66	0,54	93,67
23	223,4	231,9	8,8	9,0	0,40	208,47	0,42	94,44
8	231,0	243,6	10,1	12,9	0,49	219,16	0,50	97,67
5	233,1	244,1	8,8	11,5	0,49	200,29	0,50	95,65
M					0,49	200,29	0,50	95,65

Fonte: Próprio autor.

Nota: CP=Corpo de prova; Mi=Massa inicial do corpo de prova (g); Mf=Massa final do corpo de prova (g); C=Comprimento do cordão de solda (cm); ME_f=Massa do eletrodo fundido (g); TD=Taxa de deposição (g/s); E=Energia de soldagem (J/min); Tf=Taxa de fusão (g/s); R=Rendimento econômico (%); M=Média.

Tabela 14 - Dados para cálculo da taxa de deposição, energia de soldagem, taxa de fusão e Rendimento econômico do processo GMAW com 307 automatizado

CP	M _i	M _f	C	ME _f	TD	E	Tf	R
7	215,1	232,0	10	17,1	1,42	156,6	1,44	98,83
3	230,6	248,4	9,5	18,1	1,59	157,1	1,62	98,34
1	224,2	240,3	10	17,2	1,34	155,4	1,43	93,60
14	221,0	236,8	9,0	16,1	1,39	157,8	1,42	98,13
20	232,3	248,6	10	17,2	1,35	158,3	1,43	94,76
M					1,39	157,1	1,43	98,13

Fonte: Próprio autor.

Nota: CP=Corpo de prova; Mi=Massa inicial do corpo de prova (g); Mf=Massa final do corpo de prova (g); C=Comprimento do cordão de solda (cm); ME_f=Massa do eletrodo fundido (g); TD=Taxa de deposição (g/s); E=Energia de soldagem (J/min); Tf=Taxa de fusão (g/s); R=Rendimento econômico (%); M=Média.

Tabela 15 - Dados para cálculo da taxa de deposição, energia de soldagem, taxa de fusão e Rendimento econômico do processo GMAW com 307 manual

CP	M _i	M _f	C	ME _f	TD	E	Tf	R
10	217,8	236,2	9,1	19,8	0,80	204,9	0,87	92,80
12	229,9	249,5	10,1	22,2	0,76	209,3	0,87	87,96
6	224,1	243,7	10,2	21,1	0,80	193,1	0,87	92,74
4	227,8	251,1	10,2	25,1	0,80	225,5	0,87	92,50
17	223,5	239,9	7,9	18,7	0,76	222,0	0,87	87,43
M					0,80	209,3	0,87	92,50

Fonte: Próprio autor.

Nota: CP=Corpo de prova; Mi=Massa inicial do corpo de prova (g); Mf=Massa final do corpo de prova (g); C=Comprimento do cordão de solda (cm); ME_f=Massa do eletrodo fundido (g); TD=Taxa de deposição (g/s); E=Energia de soldagem (J/min); Tf=Taxa de fusão (g/s); R=Rendimento econômico (%); M=Média.

Tabela 16 - Dados para cálculo da taxa de deposição, energia de soldagem, taxa de fusão e Rendimento econômico do processo GMAW com 309 L manual

CP	M _i	M _f	C	ME _f	TD	E	Tf	R
13	223,9	246,6	9,1	24,5	0,78	235,8	0,85	92,40
22	225,4	244,4	10,1	21,1	0,76	190,6	0,85	89,84
9	224,5	245,0	10,2	21,4	0,81	192,0	0,85	95,74
2	219,8	237,2	10,2	18,3	0,80	167,3	0,85	94,72
11	218,9	234,2	7,9	15,7	0,82	187,8	0,85	97,43
M					0,80	190,6	0,85	94,72

Fonte: Próprio autor.

Nota: CP=Corpo de prova; Mi=Massa inicial do corpo de prova (g); Mf=Massa final do corpo de prova (g);

C=Comprimento do cordão de solda (cm); MEf=Massa do eletrodo fundido (g); TD=Taxa de deposição (g/s); E=Energia de soldagem (J/min); Tf=Taxa de fusão (g/s); R=Rendimento econômico (%); M=Média.

Tabela 17 - Dados para cálculo da taxa de deposição, energia de soldagem, taxa de fusão e Rendimento econômico do processo GMAW com 309 L automatizado

CP	M _i	M _f	C	ME _f	TD	E	Tf	R
27	226,9	242,2	9,8	16,7	1,29	155,8	1,41	91,21
19	220,4	235,2	9,5	16,2	1,29	155,8	1,41	91,16
25	227,2	240,0	9,1	15,5	1,17	159,6	1,41	82,67
21	230,8	246,0	9,9	16,9	1,27	162,0	1,41	89,86
16	226,6	241,7	9,4	16,0	1,33	160,7	1,41	94,32
M					1,29	159,6	1,41	91,16

Fonte: Próprio autor.

Nota: CP=Corpo de prova; Mi=Massa inicial do corpo de prova (g), Mf=Massa final do corpo de prova (g); C=Comprimento do cordão de solda (cm); MEf=Massa do eletrodo fundido (g); TD=Taxa de deposição (g/s); E=Energia de soldagem (J/min); Tf=Taxa de fusão (g/s); R=Rendimento econômico (%); M=Média.

Tabela 18 - Dados para cálculo da taxa de deposição, energia de soldagem, taxa de fusão e Rendimento econômico do processo GMAW com 309 L automatizado e adição de Nb

CP	M _i	M _f	C	ME _f	TD	E	Tf	R
28	225,9	250,6	10,6	25,2	1,94	162,5	1,97	98,01
24	223,7	237,5	8,8	15,1	1,29	161,3	1,41	91,38
15	225,7	241,5	9,3	15,8	1,41	161,9	1,41	99,75
26	227,8	239,4	7,7	13,1	1,25	161,9	1,41	88,33
29	229,0	250,6	13,7	23,3	1,30	167,2	1,41	92,35
M					1,30	161,9	1,41	92,35

Fonte: Próprio autor.

Nota: CP=Corpo de prova; Mi=Massa inicial do corpo de prova (g), Mf=Massa final do corpo de prova (g); C=Comprimento do cordão de solda (cm); MEf=Massa do eletrodo fundido (g); TD=Taxa de deposição (g/s); E=Energia de soldagem (J/min); Tf=Taxa de fusão (g/s); R=Rendimento econômico (%); M= Média.

4.1 TAXA DE DEPOSIÇÃO

Em relação aos dados iniciais, as taxas de deposição, calculadas conforme Equação 1, tiveram variação entre os processos semiautomático (manual) e automatizado. Os cordões de solda dos CP's 1, 3 e 4 demonstram que no processo semiautomático, por não haver o controle direto do tempo de arco aberto, os valores ficaram muito abaixo dos cordões de solda dos CP's 2, 5 e 6, caracterizando que o processo de soldagem automatizado tem o melhor controle sobre esse tempo (Tabela 7).

Na soldagem a arco com eletrodo consumível, este é fundido a uma velocidade que deve ser, para o processo funcionar de forma adequada, igual à velocidade com que ele é alimentado. No processo MIG/MAG (GMAW), um estado estacionário é atingido, no qual o comprimento do eletrodo ("stickout") é mantido relativamente constante. A velocidade de fusão de arame controla a quantidade de metal depositado na solda por unidade de tempo (taxa de deposição), influenciando diretamente o custo e a produtividade da soldagem (MODENESI, 2007).

Nas réplicas tivemos similaridade nos valores em função da taxa de deposição dos primeiros corpos de prova produzidos para este trabalho, isto é, a média da taxa de deposição dos processos SMAW, GMAW manual com 307 e GMAW manual com 309 L se mantiveram abaixo dos processos GMAW automatizado com 307, GMAW automatizado com 309 L e GMAW automatizado com 309 L e adição de Nb, ratificando os primeiros resultados expostos no levantamento de parâmetros.

Na análise estatística, pelo teste de pressupostos (ANOVA) teste de Shapiro-Wilk, tivemos normalidade ($p < 0,05$), porém não tivemos homogeneidade na variância ($p > 0,05$), conforme Figura 8. Foi utilizado o teste de Wan Der Waerden, onde as taxas de deposição dos processos GMAW 307 A ($p < 0,01$), GMAW 309 L A ($p < 0,05$) e GMAW 309 L Nb ($p < 0,01$) são estatisticamente maiores do que o SMAW; e o GMAW 307 A é estatisticamente superior ao GMAW 307 M ($p < 0,05$) e GMAW 309 L M ($p < 0,1$), conforme Quadro 4.

Figura 8 -Taxa de deposição, Teste dos pressupostos, Análise de Shapiro-Wilk

```
Shapiro-Wilk normality test
data: anovaTD.res
W = 0,73213, p-value = 4,745e-06

Levene's Test for Homogeneity of Variance (center = median)
Df F value Pr(>F)
group 5 F 1,0982 P 0,3871
24
```

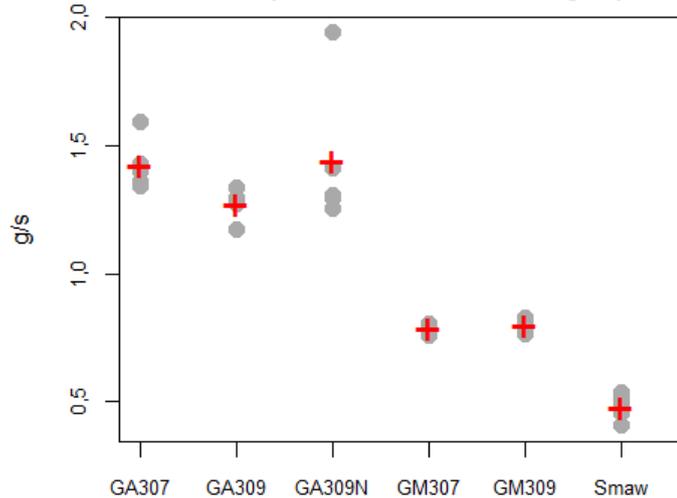
Fonte: Software R. Versão 3.5.3.

Quadro 4 - Teste de comparação múltipla de Conover and Iman. Taxa de Deposição

	GMAW 307 A	GMAW 309 L A	GMAW 309L A Nb	GMAW 307 M	GMAW 309 L M
GMAW 309 L A	0,00397				
GMAW 309L A Nb	0,29159	0,04571			
GMAW 307 M	1,0e-06	0,00297	1,5e-05		
GMAW 309 L M	3,6e-06	0,01015	5,4e-05	0,61145	
SMAW 309 L	4,5e-10	4,3e-07	3,9e-09	0,00161	0,00044

Fonte: Próprio autor (2019)

Nota: A=Automatizado; M=Manual; Nb=Nióbio.

Gráfico 1 - Distribuição de dados da Taxa de Deposição

Fonte: Próprio autor (2019)

Observando o Gráfico 1, o Processo SMAW diferencia-se do Processo GMAW e suas ramificações, possuindo a menor Taxa de Deposição, assim, os processos a gás manual têm uma similaridade, bem como o processo a gás automatizado.

4.2 ENERGIA DE SOLDAGEM

A energia de soldagem, calculada conforme Equação 2, apresentou também algumas variações, expondo que nos CP's 1, 2, 4, 5 e 6 essa variação foi aproximada, e no CP 3 tivemos uma alta energia de soldagem, assim fazendo com que esse processo também obedeça à teoria da energia de soldagem exposto na literatura, na qual pretende-se diminuir a mesma para evitar deformações excessivas.

Nas réplicas, conforme esperado, a média da energia de soldagem no processo GMAW manual com 307 manteve-se alta, assim ratifica os primeiros resultados de energia de soldagem para o levantamento de parâmetros.

Na análise estatística, pelo teste de pressupostos (ANOVA) teste de Shapiro-Wilk, tivemos normalidade ($p < 0,01$), porém não tivemos homogeneidade na variância ($p > 0,05$), conforme Figura 9. Por isso foi utilizado o teste de Wan Der Waerden, onde a Energia de Soldagem do processo GMAW 307 M ($p < 0,01$) é estatisticamente maior que os demais processos, GMAW 309 L M ($p < 0,01$) é estatisticamente superior que os processos automatizados, conforme Quadro 5.

Figura 9 - Energia de Soldagem, Teste dos pressupostos, Análise de Shapiro-Wilk

```
Shapiro-Wilk normality test

data: anovaES.res
W = 0,88169, p-value = 0,003083

Levene's Test for Homogeneity of Variance (center = median)
Df F value Pr(>F)
group 1 F 2,3304 P 0,07359
      24
---
Signif. codes:  0 '***' 0,001 '**' 0,01 '*' 0,05 '.' 0,1 ' ' 1
```

Fonte: Software R. Versão 3.5.3.

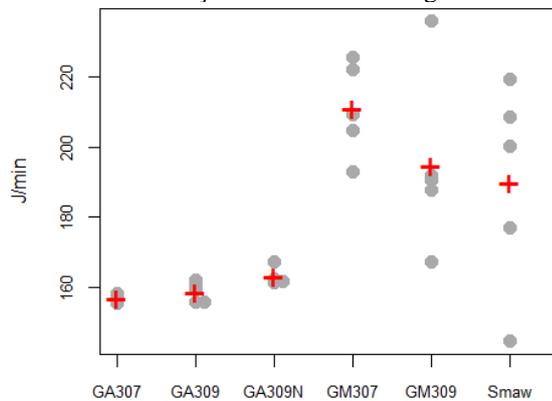
Quadro 5 - Teste de comparação múltipla de Conover and Iman. Energia de Soldagem

	GMAW 307 A	GMAW 309 L A	GMAW 309L A Nb	GMAW 307 M	GMAW 309 L M
GMAW 309 L A	0,55243				
GMAW 309L A Nb	0,06463	0,19466			
GMAW 307 M	5,4e-05	0,00025	0,00685		
GMAW 309 L M	0,00069	0,00308	0,06210	0,32661	
SMAW 309 L	0,00865	0,03343	0,36563	0,05292	0,31114

Fonte: Próprio autor (2019)

Nota: A=Automatizado; M=Manual; Nb=Nióbio.

Gráfico 2 - Distribuição de dados da Energia de Soldagem



Fonte: Próprio autor (2019)

Conforme Gráfico 2, observa-se a alta energia de soldagem no processo GMAW manual com 307, onde há uma similaridade com os processos GMAW manual com 309 L e SAMW, no entanto mostraram-se com a Energia de Soldagem aproximadas.

Os resultados da taxa de fusão, calculados pela Equação 4, serviram para cálculo do Rendimento Econômico (Equação 3), conforme Tabela 12.

4.3 RENDIMENTO ECONÔMICO

Após a observação da análise do rendimento econômico na primeira fase deste trabalho, admitiu-se um erro na coleta dos dados experimentais, o qual refletiu diretamente no resultado do rendimento econômico em que as soldas realizadas manualmente apresentaram rendimento maior que 100%, o que é antagônico com o exposto na literatura, que admite rendimento maior do que 100% somente em soldagem cujo o revestimento ou fluxo é constituído de pó metálico, o que não é o caso desse trabalho.

Na segunda fase, foi testado novamente os parâmetros até chegar a conclusão de que o problema estava em fazer a medida do tempo de arco aberto, visto que o operador do cronômetro o acionava e o desligava pela ordem oral do soldador, o que estava causando falta de sincronismo na obtenção do tempo de soldagem com o tempo real de arco aberto. Para resolver esse problema, foi executado o seguinte método: foi marcado um espaço com 90mm de comprimento por duas linhas transversais no metal de base, a primeira linha determinava o início da abertura do arco elétrico e a segunda linha a extinção do arco elétrico. Assim sendo, criou-se um padrão para o soldador começar e parar de soldar e também para o operador do cronômetro, que agora com EPI completo observava a hora de começar a marcar o tempo e também parar, ficando independente do comando do soldador.

Dessa forma, nas réplicas, a média dos rendimentos tornaram-se aceitáveis, em destaque no processo GMAW com 309 L e adição de Nb, pois adicionamos massa de Nióbio como arame frio, na qual o Rendimento foi aproximadamente 92,35%.

Na análise estatística, pelo teste de pressupostos (ANOVA) teste de Shapiro-Wilk, não tivemos normalidade e nem homogeneidade na variância, conforme Figura 10, então foi utilizado o teste de Wan Der Waerden, no qual notou-se uma aproximação estatística entre os valores, em destaque para o processo GMAW automatizado com 309 L e adição de Nióbio, que diferenciou-se dos processos GMAW automatizado com 307 e GMAW automatizado com 309 L (Quadro 6).

Figura 10 - Rendimento Econômico, Teste dos pressupostos, Análise de Shapiro-Wilk

```
Shapiro-Wilk normality test
data:  anovaRE.res
W = 0,96612, p-value = 0,4392
Levene's Test for Homogeneity of Variance (center = median)
Df F value Pr(>F)
group 5 F 0,4636 P 0,7993
      24
```

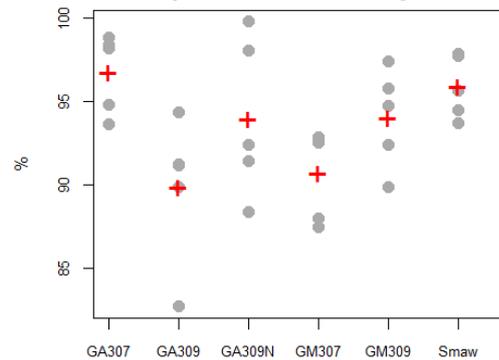
Fonte: Software R. Versão 3.5.3.

Quadro 6 - Teste de comparação múltipla de Conover and Iman. Rendimento Econômico

	GMAW 307 A	GMAW 309 L A	GMAW 309L A Nb	GMAW 307 M	GMAW 309 L M
GMAW 309 L A	0,00069				
GMAW 309L A Nb	0,02287	0,15748			
GMAW 307 M	5,7e-07	0,00893	0,00024		
GMAW 309 L M	4,2e-09	3,7e-05	9,9e-07	0,03744	
SMAW 309 L	5,9e-12	9,6e-09	4,8e-10	7,1e-06	0,00185

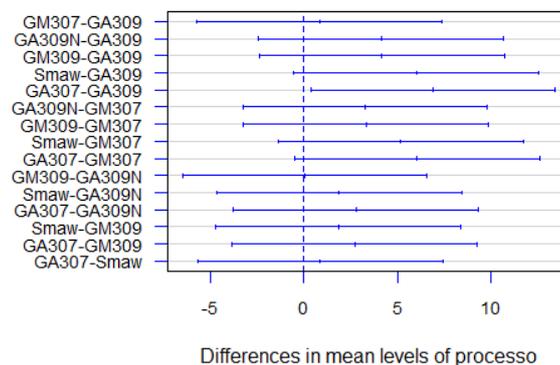
Fonte: Próprio autor (2019)

Nota: A=Automatizado; M=Manual; Nb=Nióbio.

Gráfico 3 - Distribuição de dados da Energia de Soldagem

Fonte: Próprio autor (2019)

No Gráfico 3 de distribuição de dados do Rendimento Econômico, nota-se a proximidade entre os valores, contudo, o processo GMAW automatizado com 307 aproximou-se do processo SMAW.

Gráfico 4 - Teste de Tukey para o Rendimento Econômico
95% family-wise confidence level

Para o Teste de Tukey (Gráfico 4), nota-se a diferença entre os processos GMAW automatizado com 307 e GMAW automatizado com 309 L.

4.4 GEOMETRIA DOS CORDÕES DE SOLDA

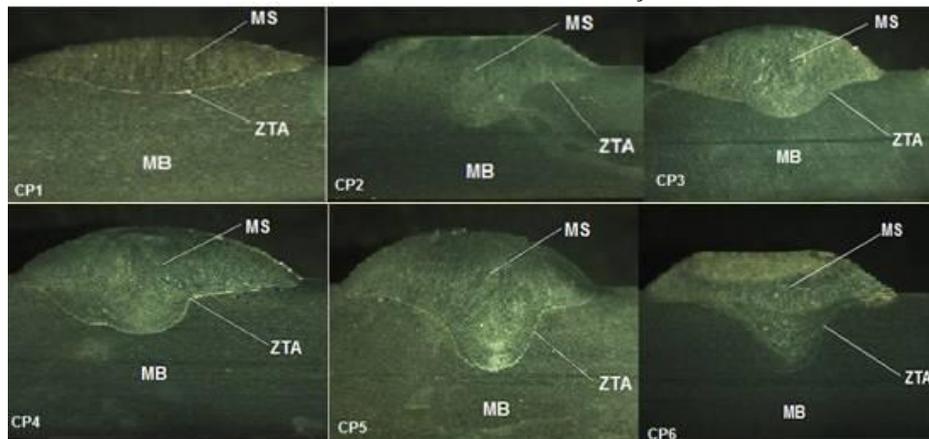
4.4.1 Perfis macrográficos

Em relação aos perfis macrográficos apresentados na Figura 11, foi notado pouca penetração no CP1 em relação aos demais, pois a influência dos gases no processo GMAW (o qual proporciona melhor penetração) e a Energia de Soldagem tiveram uma considerável influência. A Zona Termicamente Afetada (ZTA) foi pequena para todos os processos, isso afeta menos o Metal de Base e poderia se tornar um elo fraco em uma junta soldada que normalmente seria resistente, se por ventura essa ZTA fosse consideravelmente maior.

No CP6 podemos ver que há duas fases, o que pode ser atribuído à adição de Nióbio, o qual possui uma densidade menor que o metal de solda (309L) e por estar segregado à parte superior do metal fundido. Essa região apresentou pontos de microdureza maiores o que pode ratificar a tese de maior concentração de Nióbio.

Podemos observar na Figura 11 perfis macrográficos das réplicas em que não houve variações na amostra dos perfis em relação aos iniciais.

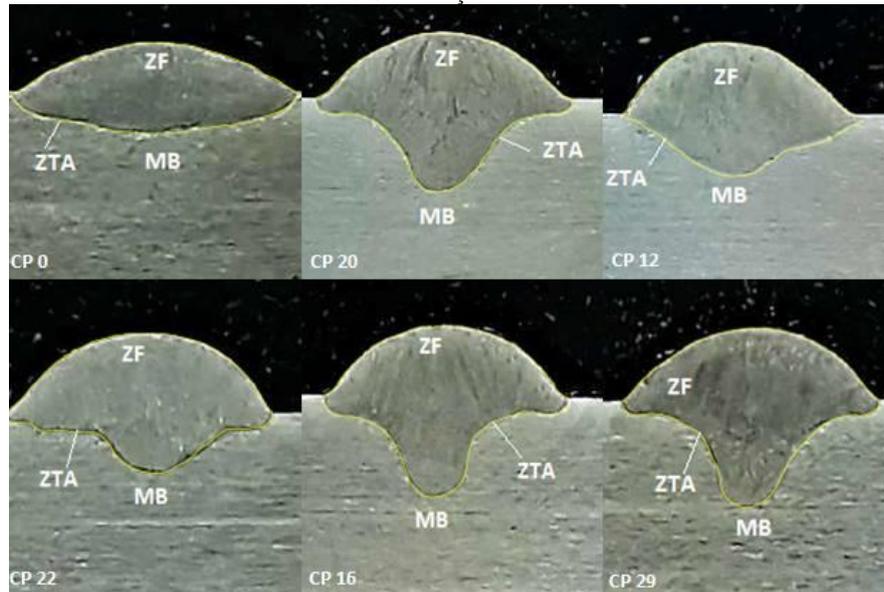
Figura 11 - Perfis macrográficos dos Corpos de Prova. CP1: SMAW; CP 2: GMAW automatizado com 307; CP3: GMAW manual com 307; CP4: GMAW manual com 309L; CP 5: GMAW automatizado com 309L; CP*6: GMAW automatizado com 309L e adição de Nb



Fonte: Próprio autor (2019).

Nas réplicas (Figura 12), podemos ver uma similaridade em relação aos perfis anteriores, pois foram utilizados os mesmos parâmetros e condições similares para a reprodução.

Figura 12 - Perfis macrográficos (réplicas). CP 0: SMAW; CP 20: GMAW automatizado com 307; CP 12: GMAW manual com 307; CP 22: GMAW manual com 309L; CP 16: GMAW automatizado com 309L; CP 29: GMAW automatizado com 309L e adição de Nb



Fonte: Próprio autor (2019).

4.4.2 Relação Reforço/Largura

A Tabela 19 mostra a variação dos valores da relação R/L em função dos parâmetros e processos de soldagem. Observa-se que o valor de R/L é menor no cordão de solda aplicado com o processo SMAW, que é o processo utilizado pela empresa de recuperação de eixo. A relação R/L é a menor de todos os cordões de solda testado e está relacionado com a quantidade de massa depositada comprovada pela menor taxa de deposição, calculada pela Equação 1 e exposta na Tabela 12 resultante nesse processo. Outra condicionante para menor R/L foi a oscilação aplicada no eletrodo durante a soldagem, que espalha a poça de fusão e resulta em um cordão mais baixo.

O cordão de solda do CP2 apresentou um acréscimo de 41,6% na relação R/L quando comparado ao cordão de solda do CP1. Outro aspecto importante é que esse cordão de solda não teve a oscilação que o processo SMAW teve, ocasionando um maior reforço influenciando diretamente no aumento da relação R/L. O cordão de solda do CP5 teve a relação R/L bem próximo ao do cordão de solda do CP2, que já era esperado, pois a única diferença entre eles são elementos de liga no metal de adição.

A maior relação R/L foi 48,14%, maior em comparação ao cordão de solda realizado pelo processo SMAW. O cordão de solda do CP3, soldado com processo de soldagem GMAW manual, oferece menor controle da poça de fusão. Mesmo com alto valor de relação R/L da ordem de 0,275 o cordão ainda está em conformidade para ser usado como revestimento, pois está abaixo da relação R/L máxima de 0,30 (CRUZ; CABRAL, 2008).

O cordão de solda do CP4 foi soldado com o mesmo processo e procedimento do cordão de solda do CP3. A única diferença é o arame eletrodo que para soldagem do CP3 foi utilizado o arame AWS 307 e no CP4 foi o AWS 309L, ambos são aço inoxidável autêntico. O CP4 teve um aumento de 39,1% em relação ao processo SMAW, ratificando o conceito de dificuldade no controle da poça de fusão.

O cordão de solda do CP6 apresentou relação R/L 22,2% maior em relação ao cordão de solda realizado com o processo SMAW. Esse cordão foi realizado com mesmo processo e mesmo parâmetro utilizado para fazer o cordão de solda do CP5. A única diferença foi a adição de 1,2g de Nióbio em forma de fita metálica na poça de fusão, a qual fez com que aumentasse a largura do cordão de solda, influenciando diretamente a relação R/L.

Nas réplicas, apesar do aumento significativo da relação reforço/largura (R/L) em relação aos valores do levantamento de parâmetros, ainda assim ficamos na margem abaixo de 0,30 informado pela literatura para ser usado como revestimento. Assim, entre os processos SMAW, a R/L das réplicas tiveram um aumento de 3,8%; no GMAW automatizado com 307 um aumento de 41,9%; no GMAW manual com 307 um aumento de 7,5%; no GMAW manual com 309 L um aumento de 23,3%; no GMAW automatizado com 309 L um aumento de 11,6% e no GMAW automatizado com 309 L e adição de Nb um aumento de 49,9%. Essas informações são retratadas nas Tabelas de 20 a 25 em relação a Tabela 19.

Tabela 19 - Geometria do cordão de solda (levantamento de parâmetros)

CP	Re	Lcs	Pe	Relação Re/Lcs	δ
1	1,87	12,88	2,17	0,14	68,39
2	2,80	11,73	4,46	0,19	64,87
3	3,68	13,36	3,16	0,27	62,15
4	2,86	12,03	3,38	0,23	64,52
5	2,83	11,47	4,20	0,24	64,92
6	2,24	12,26	4,51	0,18	66,17

Fonte: Próprio autor (2019).

Nota: CP=Corpo de prova; Re=Reforço; Lcs=Largura do cordão de solda; Pe=Penetração; δ =Diluição.

Tabela 20 - Geometria do cordão de solda (réplicas), Processo SMAW

CP	Re	Lcs	Pe	Área do reforço	Área da penetração	Relação Re/Lcs	δ
0	2,20	12,41	1,91	17,80	18,31	0,17	50,70
05	2,36	15,66	2,01	24,17	21,23	0,15	46,76
08	2,00	14,22	2,46	18,55	26,25	0,14	58,33
18	1,78	13,08	1,82	16,34	15,71	0,13	49,01
23	2,24	14,30	2,06	20,29	20,58	0,15	50,35
M						0,15	50,35

Fonte: Próprio autor (2019).

Nota: CP=Corpo de prova; Re=Reforço; Lcs=Largura do cordão de solda; Pe=Penetração; δ =Diluição; M=Média.

Tabela 21 - Geometria do cordão de solda (réplicas), Processo GMAW automatizado com 307

CP	Re	Lcs	Pe	Área do reforço	Área da penetração	Relação Re/Lcs	δ
01	3,22	11,23	4,54	24,48	24,03	0,28	49,53
03	3,15	11,68	4,42	24,60	22,76	0,26	48,05
07	3,18	11,53	4,43	23,71	23,04	0,27	49,28
14	3,23	12,05	4,42	25,56	24,63	0,26	49,07
20	3,10	12,06	4,45	24,36	24,85	0,25	50,50
M						0,26	49,28

Fonte: Próprio autor (2019).

Nota: CP=Corpo de prova; Re=Reforço; Lcs=Largura do cordão de solda; Pe=Penetração; δ =Diluição; M=Média.

Tabela 22 - Geometria do cordão de solda (réplicas), Processo GMAW manual com 307

CP	Re	Lcs	Pe	Área do reforço	Área da penetração	Relação Re/Lcs	δ
04	3,93	13,27	2,38	36,12	18,14	0,29	33,43
06	2,60	10,84	2,60	24,87	16,98	0,23	40,57
10	3,68	11,79	2,87	29,91	19,94	0,31	39,99
12	2,90	10,85	3,45	24,73	17,98	0,26	42,09
17	4,12	12,87	2,43	35,25	16,24	0,32	31,54
M						0,29	39,99

Fonte: Próprio autor (2019).

Nota: CP=Corpo de prova; Re=Reforço; Lcs=Largura do cordão de solda; Pe=Penetração; δ =Diluição; M=Média.

Tabela 23 - Geometria do cordão de solda (réplicas), Processo GMAW manual com 309 L

CP	Re	Lcs	Pe	Área do reforço	Área da penetração	Relação Re/Lcs	δ
02	3,55	12,99	2,79	30,80	18,19	0,27	37,13
09	3,96	13,20	2,46	36,51	15,88	0,30	30,31
11	3,74	12,46	2,62	32,19	16,22	0,30	33,50
13	3,91	13,34	2,68	38,17	17,63	0,29	31,59
22	3,48	12,34	2,63	29,92	15,75	0,28	34,48
M						0,29	33,50

Fonte: Próprio autor (2019).

Nota: CP=Corpo de prova; Re=Reforço; Lcs=Largura do cordão de solda; Pe=Penetração; δ =Diluição; M=Média.

Tabela 24 - Geometria do cordão de solda (réplicas), Processo GMAW automatizado com 309 L

CP	Re	Lcs	Pe	Área do reforço	Área da penetração	Relação Re/Lcs	δ
16	3,16	11,76	4,55	25,31	22,65	0,26	47,22
19	3,16	12,01	4,52	24,90	26,02	0,26	51,09
21	3,18	11,51	4,51	24,26	21,51	0,27	46,99
25	3,18	11,55	4,78	24,43	22,91	0,27	48,39
27	3,15	10,59	4,73	22,51	22,14	0,29	49,58
M						0,27	48,39

Fonte: Próprio autor (2019).

Nota: CP=Corpo de prova; Re=Reforço; Lcs=Largura do cordão de solda; Pe=Penetração; δ =Diluição; M=Média.

Tabela 25 - Geometria do cordão de solda (réplicas), Processo GMAW automatizado com 309 L e adição de Nióbio

CP	Re	Lcs	Pe	Área do reforço	Área da penetração	Relação Re/Lcs	δ
15	3,24	12,26	4,48	28,63	23,21	0,26	44,77
24	3,11	11,41	4,32	25,31	20,01	0,27	44,15
26	3,25	11,91	4,63	26,56	21,38	0,27	44,59
28	3,26	11,96	4,37	27,99	19,97	0,27	41,63
29	3,20	11,84	4,82	25,86	23,59	0,27	47,70
M						0,27	44,59

Fonte: Próprio autor (2019).

Nota: CP=Corpo de prova; Re=Reforço; Lcs=Largura do cordão de solda; Pe=Penetração; δ =Diluição; M=Média.

Na análise estatística, pelo teste de pressupostos (ANOVA) teste de Shapiro-Wilk, não tivemos normalidade e nem homogeneidade na variância, conforme Figura 13, contudo observou-se um efeito significativo dos processos de soldagem sobre a Relação Reforço/Largura [$F(5, 24) = 45,47$; $p < 0,01$]. As comparações múltiplas utilizando o teste de Tukey (Gráfico 5) indicaram que as respostas do SMAW foram inferiores aos demais processos.

Figura 13 - Relação reforço/largura, Teste dos pressupostos, Análise de Shapiro-Wilk

```

Shapiro-Wilk normality test

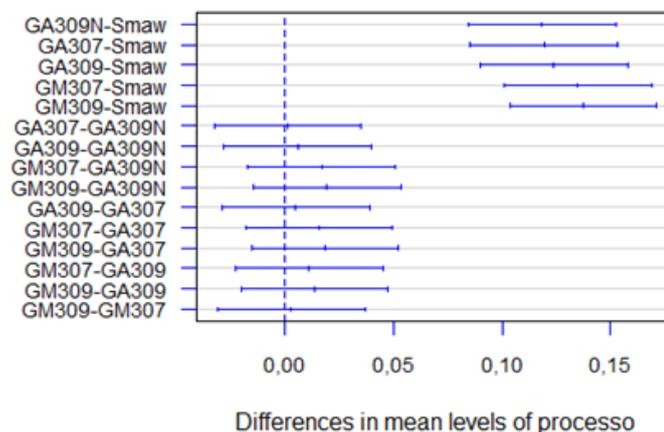
data: anovaRI_pes
W = 0,95563, p-value = 0,2386

Levene's Test for Homogeneity of Variance (center = median)
  Df F value Pr(>F)
group 5 F 2,4503 P 0,06268
  24
  
```

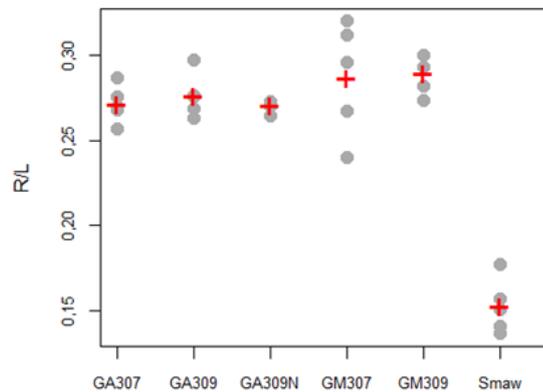
Fonte: Software R. Versão 3.5.3.

Gráfico 5 - Teste de Tukey para relação reforço/largura

95% family-wise confidence level



Fonte: Próprio autor (2019)

Gráfico 6 - Distribuição de dados da Relação Reforço/Largura

Fonte: Próprio autor (2019)

No gráfico de distribuição de dados da Relação Reforço/Largura (Gráfico 6), nota-se a diferença entre o processo SMAW entre os demais, conforme o teste de Shapiro-Wilk e o teste de Tukey, ratificando o conceito do não controle da poça de fusão para esse processo.

4.4.3 Diluição

A investigação da diluição (Tabela 19), calculada de acordo com a Equação 5, é fator de grande relevância neste trabalho, pois foram realizados revestimentos com metal de adição diferente em sua composição química, a fim de buscar um revestimento mais resistente. Apesar dos metais de adição não serem considerados dissimilares com metal de base, buscase misturá-los o menos possível. Segundo Barros (2015), o conceito de diluição é importante quando se deseja controlar a participação do metal base na formação da solda, como na soldagem de metais dissimilares, em processos de recobrimento por soldagem e na soldagem de um metal base cuja composição seja desconhecida ou apresente elevados teores de impurezas ou elementos prejudiciais à solda.

O cordão de solda realizado com processo SMAW apresentou maior diluição em relação aos cordões realizados com o processo GMAW. Os cordões 3 e 4 apresentaram diluição menor em 9,2 e 5%. A diferença de valores de diluição entre os cordões 3 e 4 está relacionado com o modo de aplicação do cordão que foi semiautomático (manual). Os cordões 2 e 5 foram soldados com mesmo processo e mesmos parâmetros do cordão 3 e 4, mas os cordões foram aplicados de forma automatizada, por isso seus valores estão bem próximos ao que expressa maior precisão entre os valores de diluição comparado com o cordão depositado pelo processo SMAW. O cordão 6 apresentou valor de diluição alto, mesmo sendo depositado com o mesmo processo, procedimento e parâmetro dos cordões 2 e 5, foi soldado com adição de Nióbio e apresentou maior penetração, o que está diretamente

relacionado ao aumento da diluição. O Nióbio diminuiu a tendência ao crescimento de grão de forma a melhorar a soldabilidade e a condutividade elétrica, o que pode ter afetado diretamente a penetração do cordão de solda.

Nas réplicas, conforme Tabelas de 20 a 24, o processo SMAW apresentou-se com maior percentual de diluição, no entanto houve diminuição da diluição em todos os processos, comparando as médias com a diluição do levantamento de parâmetros. No processo SMAW houve uma diminuição de 26,37%; no processo GMAW automatizado com 307 a diluição diminuiu cerca de 24,03%; no GMAW manual com 307, 35,65%; em destaque para o processo GMAW manual com 309L, pois esse teve o maior percentual de diminuição de diluição em relação aos primeiros corpos de provas soldados, chegando a 48,07%, no processo GMAW automatizado com 309L, 25,46% e no processo GMAW automatizado com adição de Nb, 32,60%.

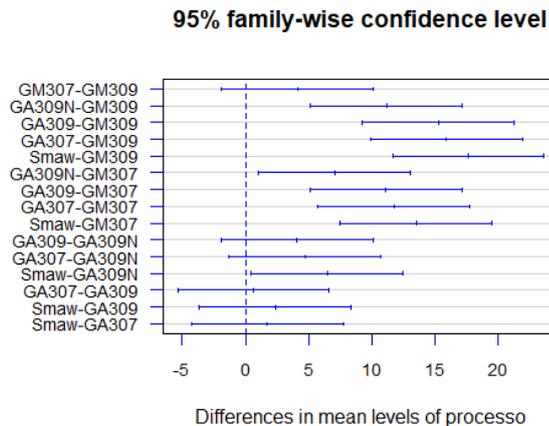
Na análise estatística, pelo teste de pressupostos (ANOVA) teste de Shapiro-Wilk, não tivemos normalidade e nem homogeneidade na variância, conforme Figura 14. Contudo, observou-se que as comparações múltiplas utilizando o teste de Tukey (Gráfico 7) indicaram que os processos automatizados possuem uma diferença entre os processos manuais, porém o processo SMAW mostrou-se semelhante aos processos GMAW automatizado com 309 L e GMAW automatizado com 307. O processo GMAW com 309 L e adição de Nióbio mostrou que, apesar do incremento dessa liga, a diluição manteve-se abaixo do processo GMAW com 309 L (sem adição de Nióbio), porém com valores aproximados.

Figura 14 - Diluição. Teste dos pressupostos, análise de Shapiro-Wilk

```
Shapiro-Wilk normality test
data: anovaDT_mes
W = 0,98048, p-value = 0,8383

Levene's Test for Homogeneity of Variance (center = median)
Df F value Pr(>F)
group 5 F 1,1012 P 0,3856
24
```

Fonte: Software R. Versão 3.5.3.

Gráfico 7 - Teste de Tukey para Diluição

Fonte: Próprio autor (2019)

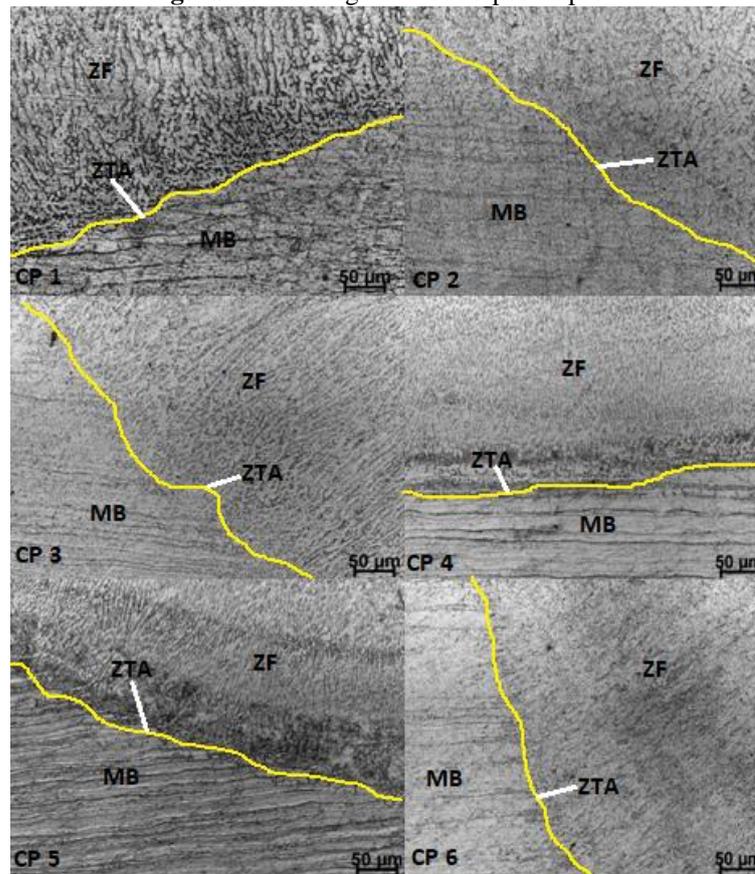
4.4.4 Micrografia dos Corpos de Prova

É observado na micrografia (Figura 15) que a região soldada apresenta crescimento epitaxial da microestrutura, fenômeno que favorece a resistência da junta, haja vista proporcionar continuidade dos grãos do Metal de Base (MB) em direção Zona Fundida (ZF); evitando-se assim o acúmulo de tensões na Zona de ligação (ZL) (DAS NEVES, 2009). Além disso, é possível observar nas imagens apresentadas que a Zona Termicamente Afetada (ZTA) dos corpos de prova é pequena, como o esperado, por tal comportamento ser característico de aços inoxidáveis.

Todos os corpos de prova apresentaram crescimento equiaxial dendrítico na ZF próxima à ZL. A microestrutura predominante é a ferrítica, em especial pelo elevado conteúdo de cromo, elemento ferritizante, na região do metal fundido combinado com a elevada taxa de resfriamento. Segundo Fredriksson (1972), em aços inoxidáveis austeníticos, altas taxas de resfriamento favorecem a formação de ferrita primária durante o processo de solidificação. Com exceção do CP 03, o qual apresentou microestrutura com característica austenítica próximo à ZL, com crescimento colunar dendrítico, o restante segue o padrão dito.

A justificativa para tal encontra-se na discrepância entre os valores de energia de soldagem do CP 03 e do restante, o que provoca uma menor velocidade de solidificação (R). A mudança em R influencia na relação G/R a qual tem como resposta a característica da solidificação do material fundido. Como os CPs 02 e 04 têm energia de soldagem semelhante, suas microestruturas são, como esperado, bem semelhantes; confirmando a discussão proposta.

Figura 15 - Micrografia dos corpos de prova



Fonte: Próprio autor (2019).

4.5 ANÁLISE ESTATÍSTICA-MÉTODO MULTICRITÉRIOS DE TOMADAS DE DECISÃO (MCDM)

Considerando-se que os processos de soldagem de revestimento em aço inoxidável AISI 316L se destinam à retificação em material do eixo propulsor naval, solicitou-se a um engenheiro mecânico experiente que organizasse as propriedades a serem avaliadas em ordem de importância. A partir dessa informação, foram estimados os pesos de cada atributo com base na ordenação por meio dos métodos de atribuição de pesos, conforme as Equações 6 a 10, apresentados na Tabela 26.

Tabela 26 - Estimativas de pesos dos atributos

Atributos	TD	R	E	D	EL	
Ordem	1	2	3	4	5	Amplitude
EW	0,20	0,20	0,20	0,20	0,20	0,00
RR	0,43	0,21	0,14	0,10	0,08	0,35
RS	0,33	0,26	0,20	0,13	0,06	0,26
RE(2)	0,45	0,29	0,16	0,07	0,01	0,43
RE(3)	0,55	0,28	0,12	0,03	0,00	0,55
ROC	0,45	0,25	0,15	0,09	0,04	0,41

Fonte: Próprio autor (2019).

Nota: EW = ponderação igual, RR = ordenação recíproca, RS= somatória; RE(p) = expoente, sendo p o valor do expoente, ROC = centroide.

O método RE com parâmetro $p=3$ apresentou maior amplitude entre os atributos com maior e menor importância (amplitude = 0,55). Os métodos com menores amplitudes foram o RS e o WE.

Numa situação em que o tomador de decisão somente é capaz de informar a ordem de prioridade dos atributos, a apresentação de uma tabela dessas estimativas seria útil uma vez que poderia tentar identificar, entre as distribuições de pesos estimadas, aquela que melhor se aproximasse de sua preferência, inserindo-as diretamente na análise, como será exemplificado mais adiante, ou adaptando-as para melhor ajuste.

Tabela 27 - Matriz de decisão com as medidas de desempenho dos processos de soldagem

Processo	TD	R	E	D	EL
Objetivo	Max	Max	Min	Min	Min
SMAW	0,47	101,26	167,38	68,39	0,14
GMAW 1	1,84	127,20	170,81	64,87	0,19
GMAW 2	0,86	99,61	227,86	62,15	0,27
GMAW 3	0,86	99,61	172,12	64,52	0,23
GMAW 4	1,65	116,47	167,27	64,92	0,24
GMAW 5	1,58	111,52	168,45	66,17	0,18
Máximo	1,84	127,20	227,86	68,39	0,27
Mínimo	0,47	99,61	167,27	62,15	0,14

Fonte: Próprio autor (2019).

Tabela 28 - Matriz normalizada

Processos	TD	R	E	D	EL
SMAW	0,25	0,79	0,99	0,90	1,00
GMAW 1	1,00	1,00	0,97	0,19	0,76
GMAW 2	0,46	0,78	0,73	1,00	0,52
GMAW 3	0,46	0,78	0,97	0,96	0,61
GMAW 4	0,89	0,91	1,00	0,95	0,58
GMAW 5	0,85	0,87	0,99	0,93	0,79

Fonte: Próprio autor (2019).

Tabela 29 - Pontuações finais de cada processo de soldagem obtidas pelo método SAW por método de ponderação

Processos	EW	RR	RS	RE(2)	RE(3)	ROC
SMAW	0,79	0,61	0,68	0,59	0,52	0,59
GMAW 1	0,94	0,97	0,97	0,98	0,99	0,98
GMAW 2	0,70	0,64	0,68	0,64	0,60	0,64
GMAW 3	0,75	0,67	0,72	0,68	0,63	0,67
GMAW 4	0,87	0,89	0,90	0,91	0,91	0,90
GMAW 5	0,89	0,88	0,89	0,88	0,88	0,88

Fonte: Próprio autor (2019).

Tabela 30 - Posições de cada processo de soldagem obtidas pelo método SAW por método de ponderação

Processos	EW	RR	RS	RE(2)	RE(3)	ROC
SMAW	4	6	5	6	6	6
GMAW 1	1	1	1	1	1	1
GMAW 2	6	5	6	5	5	5
GMAW 3	5	4	4	4	4	4
GMAW 4	3	2	2	2	2	2
GMAW 5	2	3	3	3	3	3

Fonte: Próprio autor (2019).

As estimativas de pesos foram utilizadas para avaliação, pelo método SAW, dos cinco métodos de soldagem no procedimento de reparo do eixo propulsor naval em aço inoxidável AISI 316L, no intuito de ilustrar o efeito das estimativas de pesos sobre o resultado final de uma avaliação multicritério.

As medidas de desempenho foram coletadas de um corpo de prova para cada método e são apresentadas na Tabela 27, juntamente com objetivo desejado para cada atributo.

A Tabela 28 exhibe os valores dos desempenhos normalizados por meio das Equações 13 e 14, respectivamente, observados seus objetivos de maximização ou minimização, de forma a superar o obstáculo à comparação em decorrência de escalas diferentes.

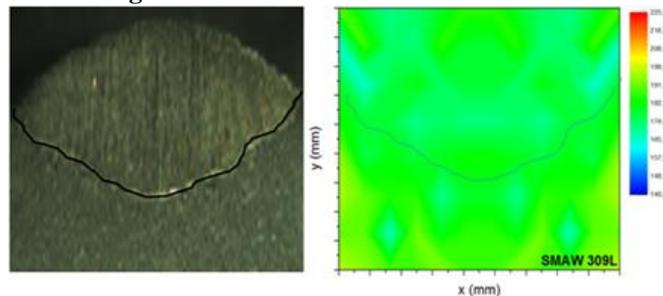
Os resultados finais das avaliações são apresentados nas Tabelas 29 e 30, aquela com as pontuações finais (S_i) dos processos e esta com as posições alcançadas por cada processo considerando os pesos atribuídos às propriedades por cada método de estimação. Observa-se que o GMAW automatizado AWS AR 307 (GMAW 1), neste estudo, revelou-se a melhor alternativa para retificação de eixo naval em todas as distribuições de estimativas de pesos. De fato, o GMAW 1 obteve valores finais de utilidade bem acima dos demais, em média de 0,97, enquanto que a segunda maior média foi 0,90 (GMAW 4).

Todavia, é interessante notar que houve alterações de posições nos métodos EW, RR e RS, mais frequentemente nos dois primeiros, provavelmente em virtude de estimarem distribuições de pesos com menores amplitudes. Por exemplo, o processo SMAW, foi classificado em três posições diferentes e o processos GMAW 4 e GMAW 5 oscilaram entre a segunda e a terceira posição. Apesar de não se verificar alterações quando se aplicaram os métodos ER2, ER3 e ROC, não se pode afirmar que, em comparações nas quais as alternativas possuam desempenhos mais similares, tal estabilidade se mantenha.

4.6 ENSAIO DE MICRODUREZA

O ensaio de microdureza foi utilizado para a avaliação da propriedade mecânica do revestimento, uma vez que as melhores condições para o mesmo é que tenha boa resistência mecânica, mantendo as mesmas propriedades do substrato. Podemos observar na investigação do CP 01 (Figura 16) a dureza do revestimento bem próxima a do metal de base. Esse resultado é satisfatório, mas ainda não atende a exigência de durabilidade do eixo que desgasta precocemente.

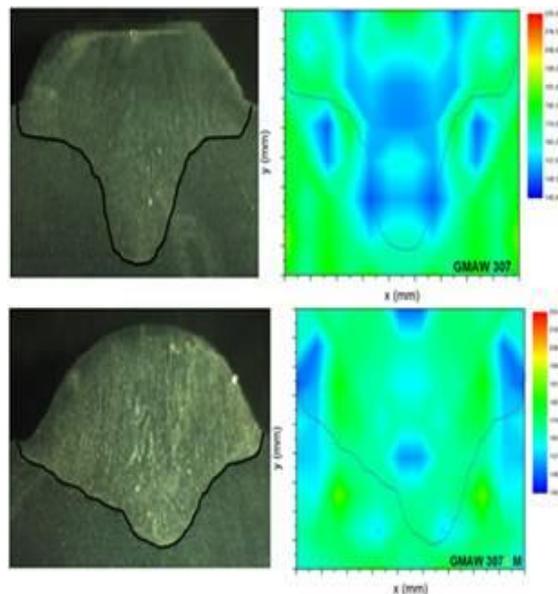
Figura 16 - Gráfico de microdureza do CP1



Fonte: Próprio autor (2019).

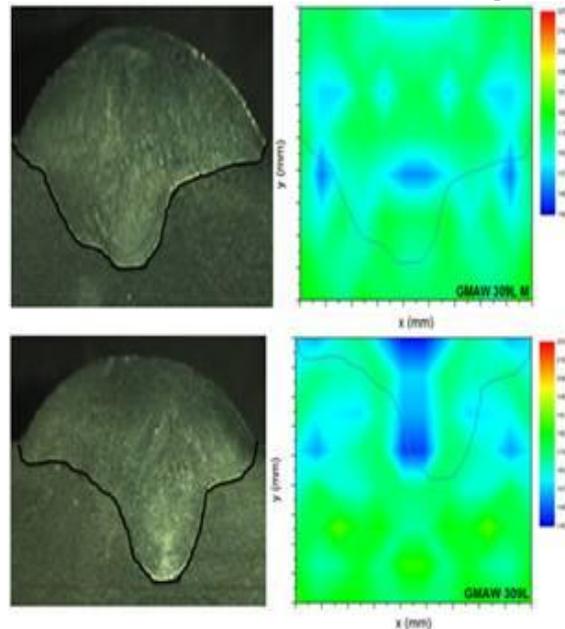
Os corpos de prova 02 e 03 (Figura 17) foram soldados com processo GMAW que possui dureza menor quando comparado com o CP01. Segundo o fabricante de consumíveis Galeazzi, cordões depositados com eletrodo revestido tem maior resistência quando comparado com arame eletrodo nu em função de alguns elementos de liga que o eletrodo revestido carrega em seu revestimento. O CP03 tem maior dureza em relação ao 02, o que pode estar relacionado à energia de soldagem que facilita a nucleação de fases com maior dureza. Essa relação se aplica ao CP's 04 e 05 (Figura 18).

Figura 17 - Gráfico de microdureza CP's 2 e 3 respectivamente



Fonte: Próprio autor (2019).

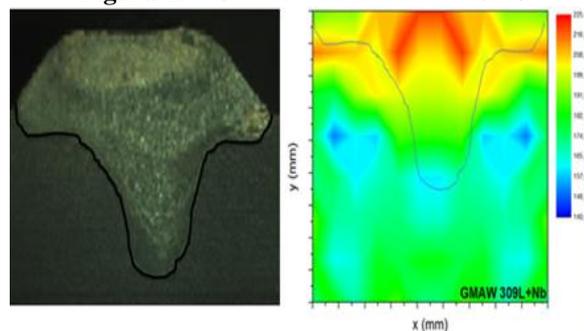
Figura 18 - Gráfico de microdureza CP's 4 e 5 respectivamente



Fonte: Próprio autor (2019).

A adição de Nióbio aumentou consideravelmente a dureza do revestimento. Podemos observar que a maior dureza ficou mais na superfície do cordão de solda (Figura 19), indicando também que as fases constituídas de nióbio estão nesse local. Pode-se comprovar isso pela diferença de cores na macrografia do CP 06 (Figura 19). Já é previsto em literatura o aumento da dureza do aço quando introduzido o nióbio, mas no caso do cordão de solda tivemos resultados além da expectativa, uma vez que a superfície do cordão ficou com maior dureza e quase toda área do finger ficou com dureza próxima a do metal de base.

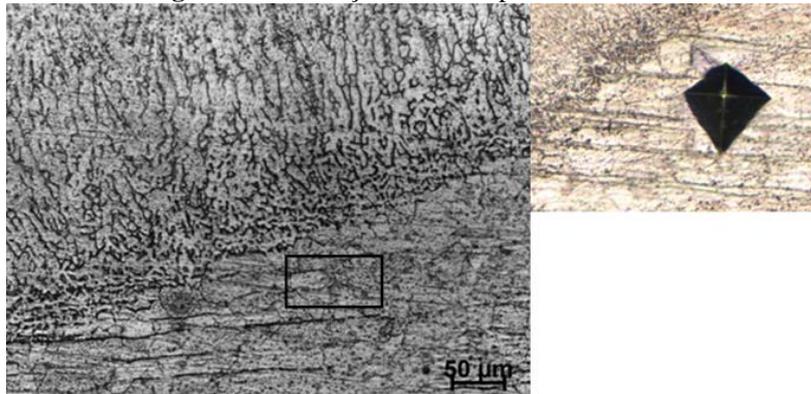
Figura 19 - Gráfico de microdureza CP 6



Fonte: Próprio autor (2019).

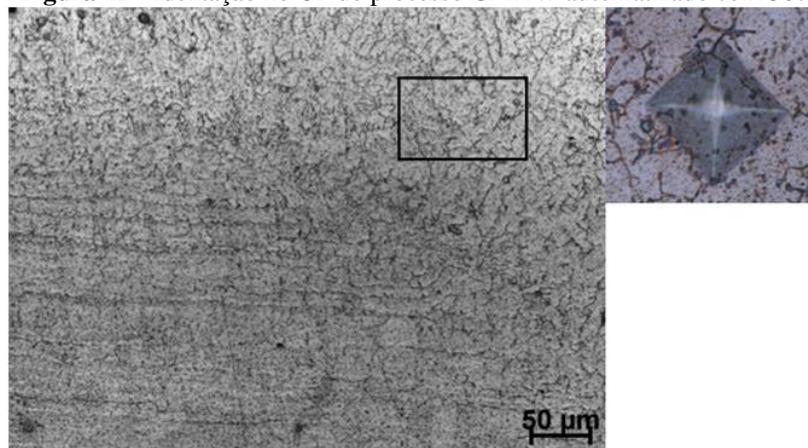
A microdureza das réplicas apresentou valores de média semelhante aos corpos de prova do levantamento de parâmetros. Como foi feito um mapeamento de microdureza para o levantamento de parâmetros, nas réplicas, foram feitas identificações sequenciais na ZF, ZTA e MB como exposto nas Figuras de 20 a 25.

Figura 20 - Identação no CP do processo SMAW



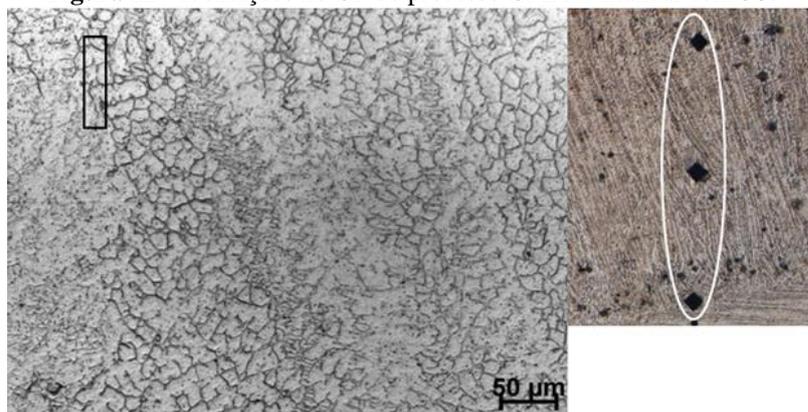
Fonte: Próprio autor (2019).

Figura 21 - Identação no CP do processo GMAW automatizado com 307



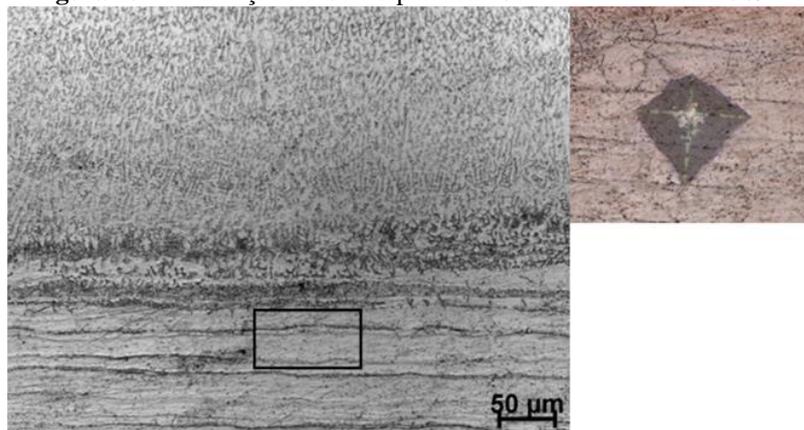
Fonte: Próprio autor (2019).

Figura 22 - Identações no CP do processo GMAW manual com 307



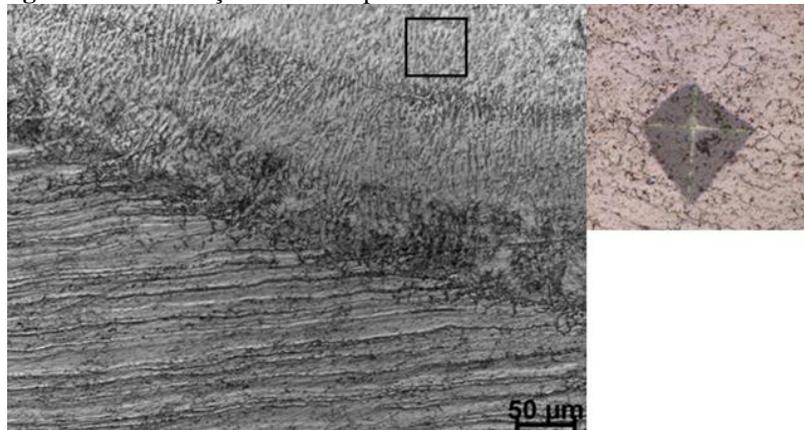
Fonte: Próprio autor (2019).

Figura 23 - Indentação no CP do processo GMAW manual com 309 L



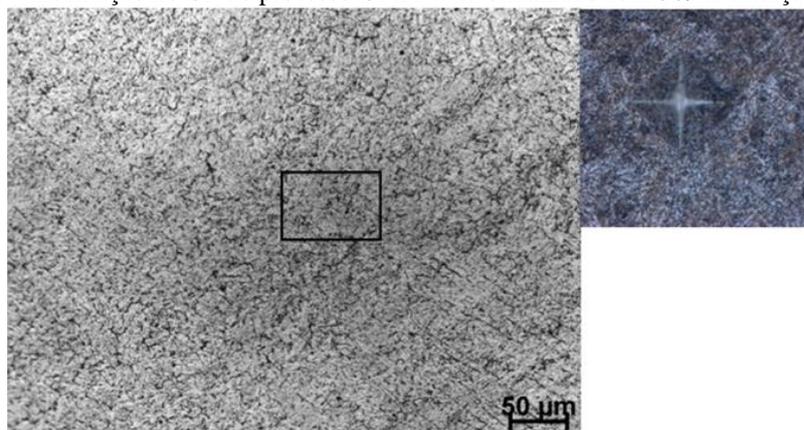
Fonte: Próprio autor (2019).

Figura 24 - Indentação no CP do processo GMAW automatizado com 309 L



Fonte: Próprio autor (2019).

Figura 25 - Indentação no CP do processo GMAW automatizado com 309 L e adição de Nióbio



Fonte: Próprio autor (2019).

Na análise estatística, tendo em vista que os resíduos da Anova não eram normalmente distribuídos ($W=0,83$; $p<0,01$) conforme Figura 26, utilizou-se o Teste de Van der Waerden (Quadro 7) que revelou efeitos significantes dos processos sobre a Zona de Fundição ($X^2=22,505$, $p < 0,01$, $df = 5$).

Figura 26 - Microdureza. Teste dos pressupostos, análise de Shapiro-Wilk

```

Shapiro-Wilk normality test

data: anovaMZF.res
W = 0,82817, p-value = 0,0002233

Levene's Test for Homogeneity of Variance (center = median)
  Df F value Pr(>F)
group 5 F 0,6278 P 0,6802
      24

```

Fonte: Software R. Versão 3.5.3.

Quadro 7 - Teste de comparação múltipla de Conover and Iman. Microdureza

	GMAW 307 A	GMAW 309 L A	GMAW 309 L Nb	GMAW 307 M	GMAW 309 L M
GMAW 309 L A	0,31342				
GMAW 309 L Nb	0,35804	0,06087			
GMAW 307 M	0,00204	0,00015	0,01872		
GMAW 309 L M	0,00053	0,00669	4,9e-05	1,1e-07	
SMAW 309 L	0,00133	9,8e-05	0,01266	0,86427	7,2e-08

Fonte: Próprio autor (2019).

Nota: A= Automatizado; M= Manual; Nb= Nióbio

As comparações múltiplas indicaram que o processo com Nióbio (M=392,9; EP=6,67) difere significativamente dos demais processos. O SMAW (M=392,9; EP=6,67) difere dos demais processos com exceção do G309M.

4.7 MÉTODO DE AVALIAÇÃO MULTIATRIBUTO-AVALIAÇÃO PROPORCIONAL COMPLEXA

Conforme exposto nesse trabalho, foram confeccionados trinta corpos de prova de aço inoxidável AISI 316 L para serem soldados com dois processos de diferentes, Shielded Metal Arc Welding (SMAW) e Gas Metal Arc Welding (GMAW). O processo a gás foi exposto com ramificações, ou seja, os corpos de prova foram soldados com dois arames eletrodos diferentes (307 e 309 L), além de ser utilizado processo automatizado e manual. No processo automatizado com 309 L, foi incrementado massa de Nióbio, elemento ligante, para verificar o aumento ou não de dureza no revestimento soldado. As estimativas dos atributos foram calculadas a partir dessa construção.

De posse das estimativas dos seis atributos relacionados com produção dos corpos de prova, realizou-se a avaliação pelo método COPRAS, detalhado na sequência do texto.

A matriz de decisão com os dados de desempenho das alternativas dos corpos de prova em análise é apresentada na Tabela 33, a identificação do objetivo desejado para cada atributo está representado na Tabela 31.

Tabela 31 - Atributos e objetivos

Atributos	Código	Dir
1- Microdureza	HV	+
2- Diluição	δ	-
3- Taxa de Deposição	TD	+
4- Rendimento Econômico	R	+
5- Relação Reforço/Largura	R/Lcs	-
6- Energia de Soldagem	E	-

Fonte: Próprio autor (2019).

Tabela 32 - Médias dos atributos

	HV	Δ	TD	R	R/Lcs	E
GMAW 307A	214,0	49,29	1,42	96,74	0,27	157,1
GMAW 309A	207,5	48,66	1,27	89,85	0,27	158,8
GMAW 309 L Nb	392,9	44,57	1,44	93,97	0,27	163,0
GMAW 307 M	223,8	37,53	0,78	90,69	0,28	211,0
GMAW 309 L M	190,5	33,41	0,79	94,01	0,28	194,7
SMAW	189,4	51,03	0,48	95,85	0,15	189,9

Fonte: Próprio autor (2019).

Tabela 33 - Matriz de decisão dos atributos

	HV	Δ	TD	R	R/Lcs	E
p	1	2	3	4	5	6
n-p+1	6	5	4	3	2	1
w	0,286	0,238	0,19	0,143	0,095	0,048

Fonte: Próprio autor (2019).

Nota: p =posição do atributo na ordenação, sendo 1 o mais importante e 7 o menos importante, e n =total de atributos.

Tabela 34 - Matriz normalizada e ponderada

HV	δ	TD	R	Re/Lcs	E
0,04	0,04	0,04	0,02	0,01	0,00
0,04	0,04	0,03	0,02	0,01	0,00
0,07	0,04	0,04	0,02	0,01	0,00
0,04	0,03	0,02	0,02	0,01	0,00
0,03	0,03	0,02	0,02	0,01	0,00
0,03	0,04	0,01	0,02	0,00	0,00

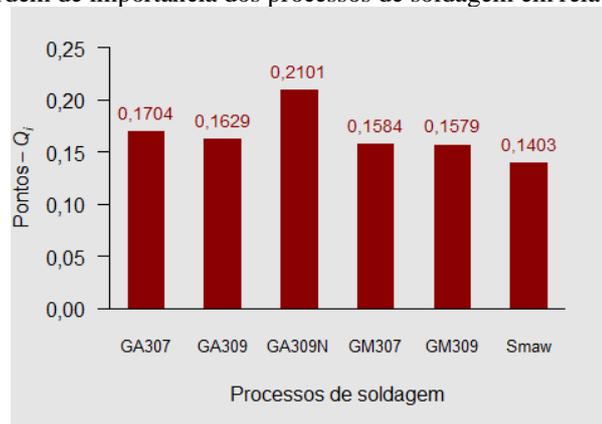
Fonte: Próprio autor (2019).

Tabela 35 - Prioridade relativa

	Alternative	Splus	Sminus	Invsminus	Q	Rank
GMAW 307A	1	0,11	0,06	14,70	0,17	2
GMAW 309A	2	0,10	0,06	14,74	0,16	3
GMAW 309 L A Nb	3	0,14	0,06	15,62	0,21	1
GMAW 307 M	4	0,09	0,06	16,44	0,15	4
GMAW 309 L M	5	0,08	0,05	17,68	0,15	5
SMAW	6	0,07	0,06	15,68	0,14	6

Fonte: Próprio autor (2019).

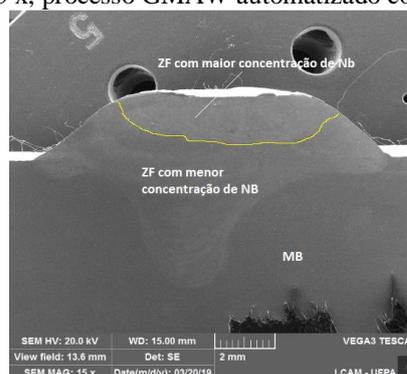
Conforme exposto pelo COPRAS, seguindo os passos para chegar a uma definição, o processo GMAW automatizado com 309 L e adição de Nióbio, na ordenação do mais para o menos importante, ficou em primeiro no rank, onde o processo SMAW ficou em último, conforme Tabela 33 e exposto no Gráfico 8.

Gráfico 8 - Ordem de importância dos processos de soldagem em relação aos atributos

Fonte: Próprio autor (2019).

4.8 MICROSCOPIA ELETRÔNICA DE VARREDURA- MEV

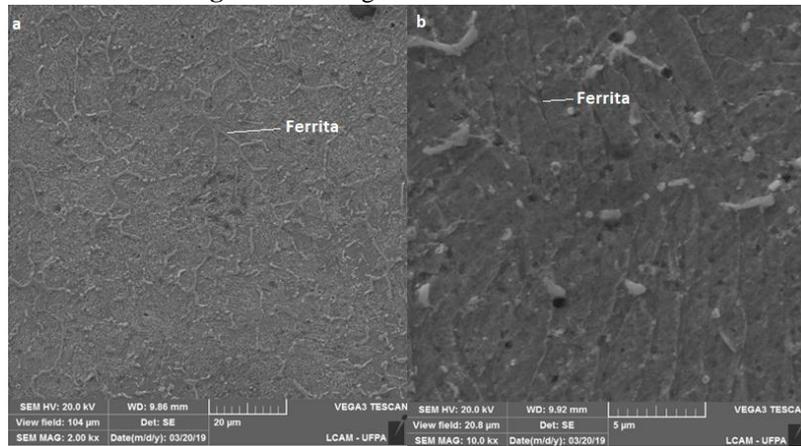
Na Figura 27, identificamos, através da imagem SE, a Zona Fundida com maior concentração de Nióbio (parte superior do revestimento), bem como a Zona Fundida com menor concentração de Nióbio (parte inferior do revestimento).

Figura 27 - Imagem SE 15 x, processo GMAW automatizado com 309 L e adição de Nióbio

Fonte: Próprio autor (2019).

Com a imagem SE mais ampliadas (Figura 28), podemos distinguir as fases principais da constituinte da Zona Fundida, conforme literatura o Nióbio é elemento estabilizante da Ferrita, onde podemos ver essa fase com nitidez na imagem subsequente.

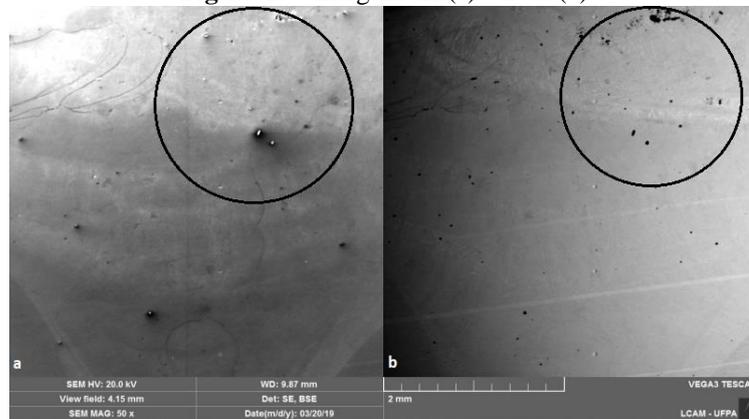
Figura 28 - Imagem SE:a: 2 kx e b: 10kx



Fonte: Próprio autor (2019).

Com a comparação de imagens SE e BSE, vemos o que, a princípio, possa ser porosidade (Figura 29b), no entanto, com a imagem SE (Figura 29a), vemos que não trata-se de porosidade e sim precipitados de Nióbio.

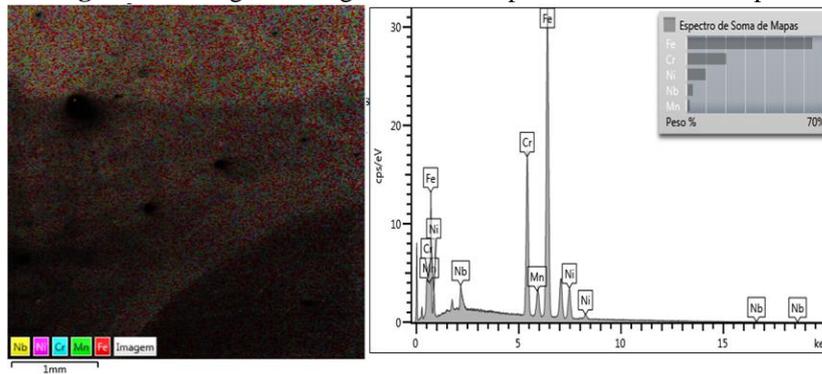
Figura 29 - Imagem SE (a) e BSE (b)



Fonte: Próprio autor (2019).

A imagem EDS, por ser pontual, temos uma melhor distribuição dos elementos que constituem a Zona Fundida, Zona de Ligação e Metal de Base. Na Figura 30, foi exposta a imagem de EDS global juntamente com o seu espectro.

Figura 30 - Imagem EDS global com o espectro da soma dos mapas

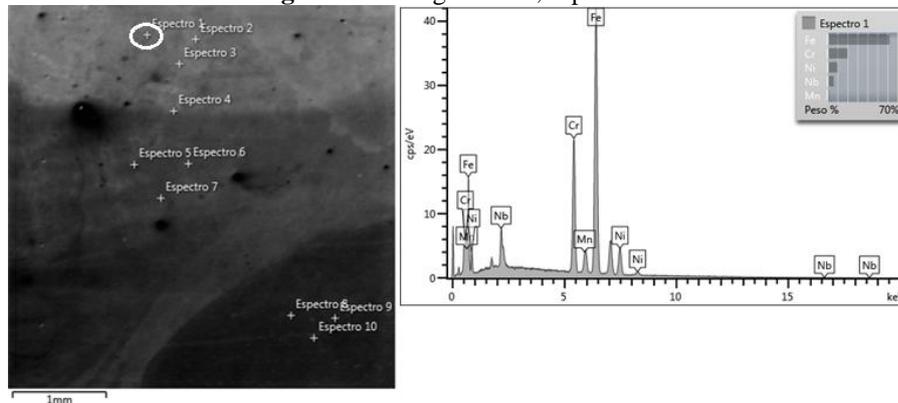


Fonte: Próprio autor (2019).

É visível a porcentagem de cada elemento que constitui o aço inoxidável, como Fe, Cr, Ni e Mn, além do Níobio incrementado como elemento ligante.

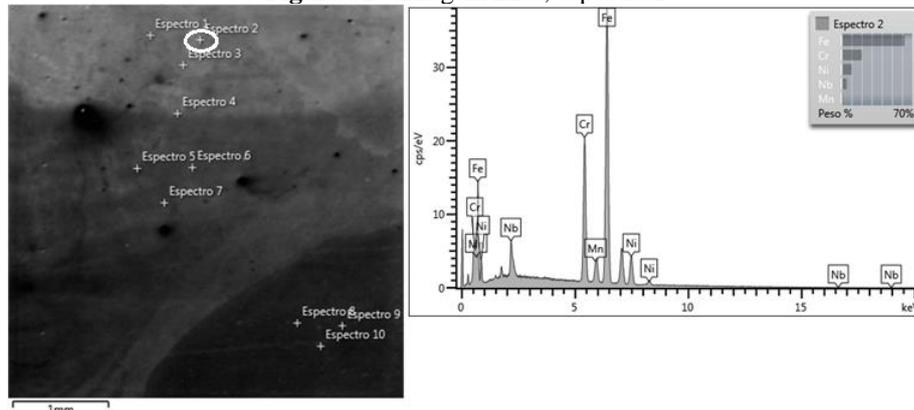
Pegando pontos específicos do corpo de prova, é notório que, do espectro 1 ao 7, temos concentração de Níobio. À medida que a análise pontual afasta-se da Zona Fundida, local onde foi incrementado Níobio, a presença desse elemento diminui exponencialmente, ficando, assim, a partir do espectro 8 ao 10, apenas os elementos que compõem o aço inoxidável (Figuras de 31 a 40).

Figura 31 - Imagem EDS, espectro 1



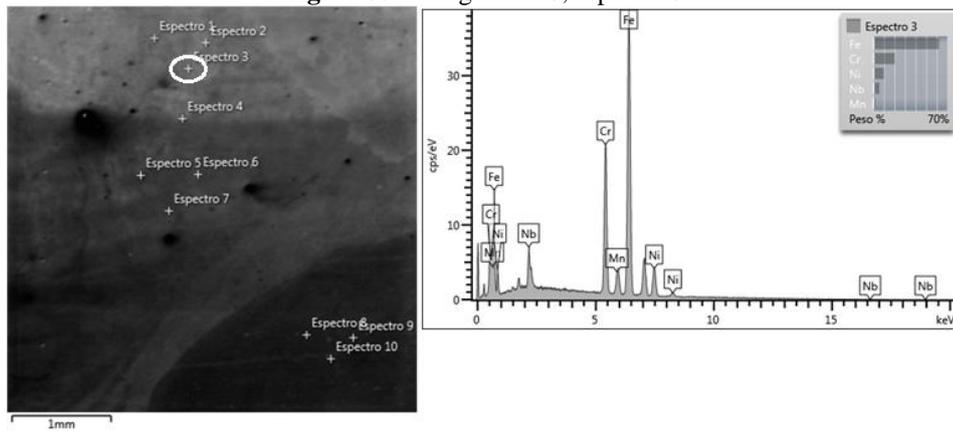
Fonte: Próprio autor (2019).

Figura 32 - Imagem EDS, espectro 2



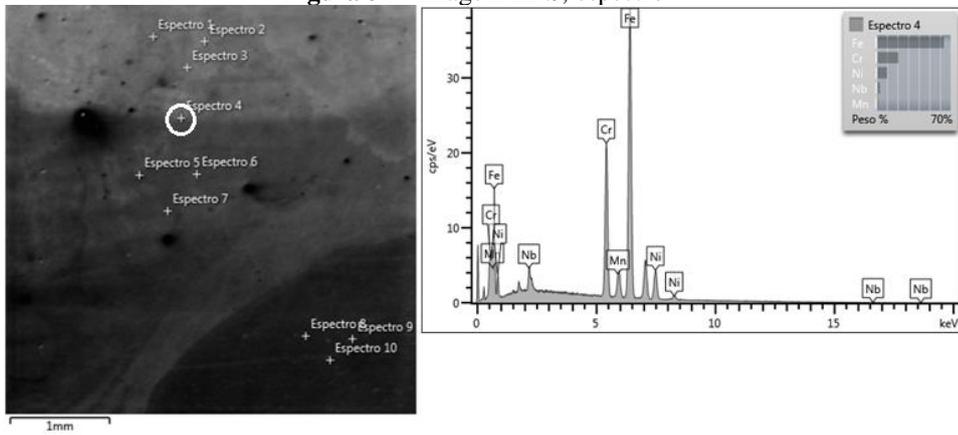
Fonte: Próprio autor (2019).

Figura 33 - Imagem EDS, espectro 3



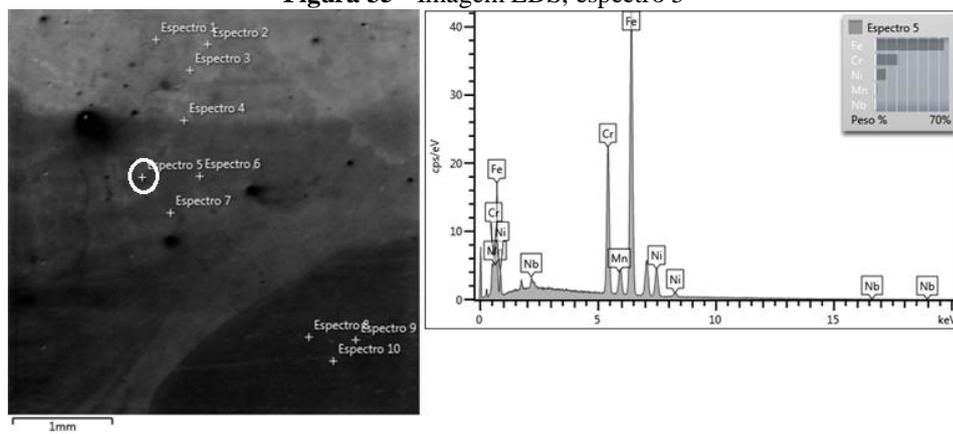
Fonte: Próprio autor (2019).

Figura 34 - Imagem EDS, espectro 4



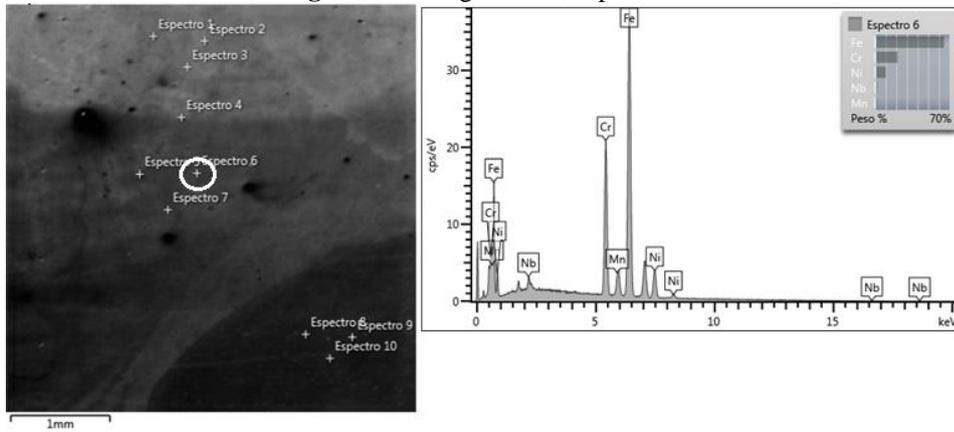
Fonte: Próprio autor (2019).

Figura 35 - Imagem EDS, espectro 5



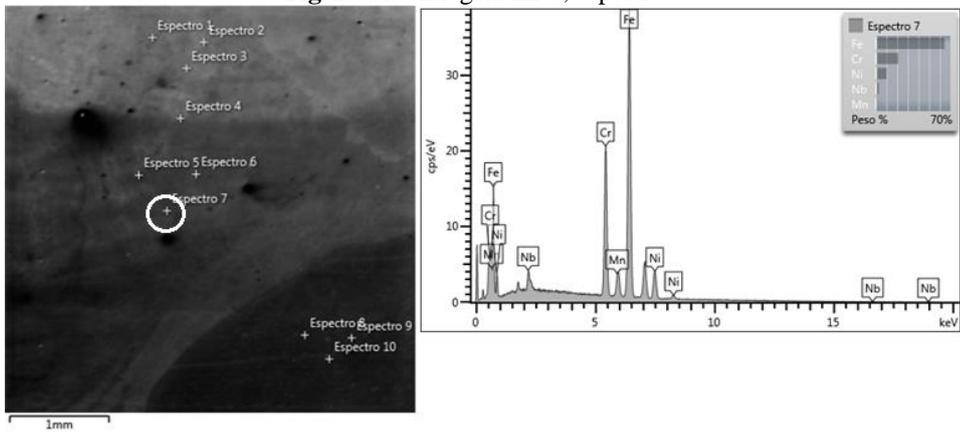
Fonte: Próprio autor (2019).

Figura 36 - Imagem EDS, espectro 6



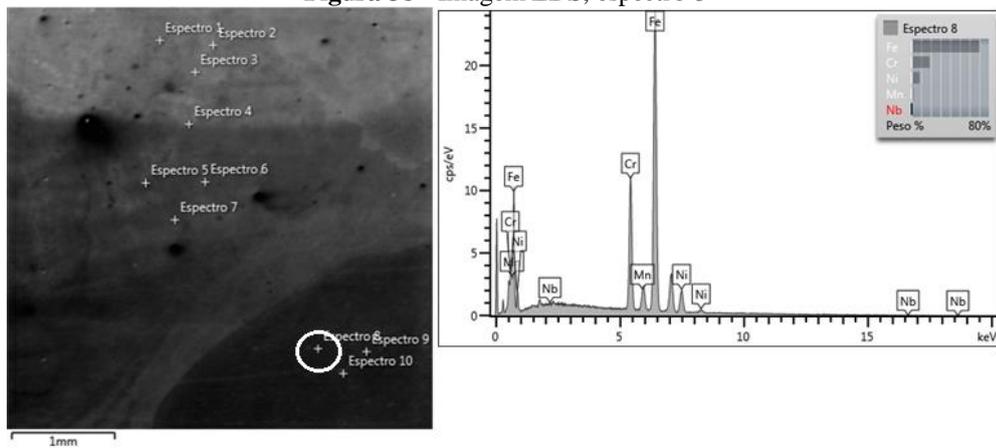
Fonte: Próprio autor (2019).

Figura 37 - Imagem EDS, espectro 7



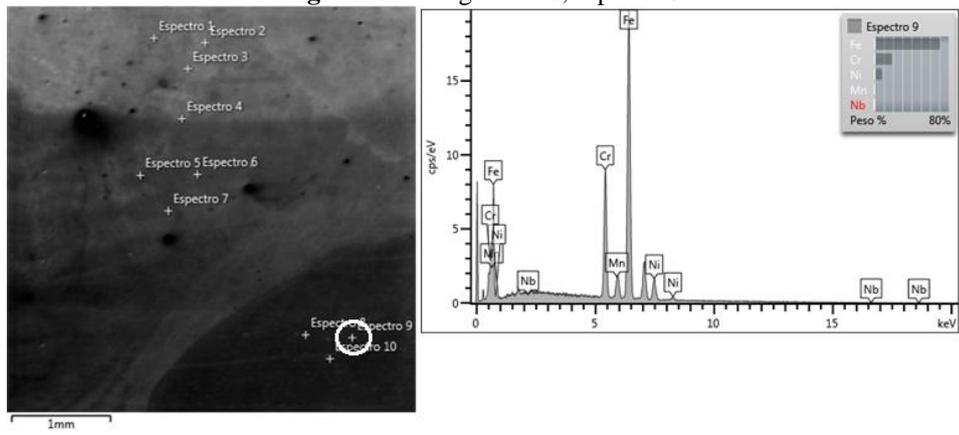
Fonte: Próprio autor (2019).

Figura 38 - Imagem EDS, espectro 8



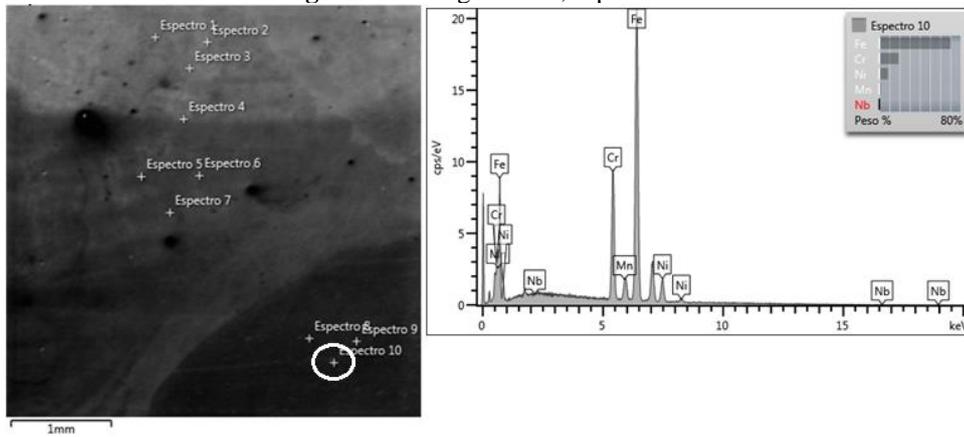
Fonte: Próprio autor (2019).

Figura 39 - Imagem EDS, espectro 9



Fonte: Próprio autor (2019).

Figura 40 - Imagem EDS, espectro 10



Fonte: Próprio autor (2019).

5 CONCLUSÕES

Os resultados dos experimentos demonstraram que os indicadores Taxa de Deposição (TD), Energia de Soldagem (E), Rendimento Econômico (R) e Diluição (δ) do processo GMAW e suas ramificações foram satisfatórios. Mesmo com os CP's 3 e 4, os quais foram realizados de forma manual e sem o controle adequado das variáveis que poderiam fazer uma considerável diferença quando comparado ao processo SMAW, o processo realizado não deixa de ser relevante. O pacote operacional do processo GMAW apresentou melhor desempenho em relação ao processo SMAW cuja taxa de deposição é quase duas vezes maior com energia de soldagem muito próxima ao SMAW, o que satisfaz a necessidade da indústria naval. Para ratificar o levantamento de parâmetros, os corpos de prova referente às réplicas, o processo GMAW confirmou sua relevância para a fabricação de revestimentos.

Na macrografia, observa-se que a geometria do cordão de solda de todos os CP's foi satisfatória. As soldas produzidas pelo processo GMAW apresentaram não só maior penetração ou área de "finger", mas também com menor diluição, o que é favorável para revestimento. Esse resultado é devido ao estudo e implantação dos parâmetros de soldagem impostos aos processos e suas ramificações para obter características próximas ou melhores das soldas feitas pelo processo SMAW.

Na análise micrográfica, todos os CP's tiveram microestruturas muito parecidas, com exceção do processo GMAW manual com 307, o qual teve um crescimento equiaxial considerável do grão, devido ao alto gradiente térmico e ao resfriamento sofrido por esse CP. A adição do Nióbio (Nb) não modificou o tipo de solidificação e conseqüentemente não alterou a microestrutura, demonstrando que para o pacote operacional do trabalho a variável de maior influência microestrutural é a energia de soldagem.

Na Microdureza, o processo GMAW demonstrou valores de dureza (HV) bem próximos ao processo SMAW, em destaque para ramificação do processo GMAW com adição de Nióbio (Nb), na qual podemos perceber um aumento significativo de dureza na parte superior do reforço.

A análise do MEV mostrou que o nióbio se concentrou em sua maioria na superfície do metal de solda como se tinha planejado para esse trabalho, onde teremos uma dureza maior na parte superior e menor na parte do substrato, fazendo com que esse processo tenha um melhor comportamento mecânico em relação aos demais. Esse resultado é mais esperado pela indústria, pois necessita-se aumentar a resistência do revestimento sem mudar a propriedade mecânica do substrato.

Para os pesos das propriedades destinadas à comparação de processos de soldagem utilizados no reparo de eixo propulsor naval de aço inoxidável AISI 316L com base na ordenação fornecida pelo tomador de decisão, foram realizadas seis estimativas de atribuição de pesos com base nas ordenações dos atributos a partir de cinco métodos.

Após a realização de mensuração dos desempenhos globais dos processos pelo método SAW utilizando tais estimativas, observou-se que a atribuição de pesos pode alterar a posição das alternativas, o que pode determinar seleções diferentes, em especial, quando os métodos não geram estimativas muito dispersas, como o método de ponderação igual (EW), em que não há dispersão, e método de ordenação recíproca (RR). Assim, a atribuição de pesos não é uma tarefa que possa ser considerada banal.

Para os teste de Shapiro-Wilk, todos os processos demonstraram uma divergência, ou seja, quando demonstrava normalidade, a homogeneidade divergia, assim pelo teste de Van Der Waerden foi constatado a diferença entre os processos.

Na Análise Multitributo COPRAS, a qual foi definida a ordem de prioridade dos atributos para as réplicas, o processo GMAW automatizado com adição de Nióbio teve uma diferença entre os demais processos, qualificando esse para retificação em eixos propulsores navais.

Sugere-se que, diante de uma situação em que o tomador de decisão é somente capaz de informar a ordem de prioridades dos atributos, elabore-se uma tabela ou gráficos com as distribuições de pesos dos métodos para que se possa tentar identificar aquela que se aproxime da melhor forma possível de suas preferências ou para que possa também ajustá-la antes de avançar para a fase de avaliação final das alternativas em análise.

REFERÊNCIAS

- ARAÚJO, W. R. **Comparação entre soldagem robotizada com eletrodo sólido e metal cored – A ocorrência do finger**. 2004. 91 p. Dissertação (Mestrado em Engenharia Mecânica) – Escola de Engenharia, Universidade Federal de Minas Gerais, Belo Horizonte.
- ASSUNÇÃO P. D. **Estudo da viabilidade do processo de soldagem GMAW-DCW (DOUBLE COLD WIRE)**. [dissertação de mestrado] Universidade Federal do Pará, 2013.
- BARBEDO, N. D. D. Avaliação comparativa dos processos de soldagem GMAW e FCAW utilizando aço ASTM A-36 para verificar a soldabilidade, propriedades metalúrgicas e geométricas, e resistência mecânica. 2011.
- BARRON F. H.; BARRETT B. E. Decision quality using ranked attribute weights. **Management Science**. 1996.
- BARROS, P. S. **Influência da convecção forçada em juntas soldadas**. Dissertação de Mestrado. 76p. 2015.
- BISWAS, S. A.; DATTA, S.; BHAUMIK, S.; MAJUMDAR, G. **Application of VIKOR Based Taguchi Method for Multi Response Optimization: a case study in submerged arc welding (SAW)**. In Proceedings of the International Conference on Mechanical Engineering; 2009 dez 26-28; Dhaka, Bangladesh, 2009;1-5.
- BRAGA, E. M. **Aspectos sobre Descontinuidades em Juntas Soldadas**. Apostila do Curso Metalurgia da Soldagem e em Tópicos em Processos de Fabricação - Universidade Federal do Pará, Programa de Pós-graduação em Engenharia Mecânica, Belém, 2008.
- BUEDE, D. M.; MILLER, W. D. The engineering design of systems: models and methods. New York: **John Wiley & Sons**, 2016.
- CAPRACE, J. D.; RIGO, P. **Multi-criteria decision support for cost assessment techniques in shipbuilding industry**. In Proc. of Conference COMPIT'09, 10–12, Mai 2009 (pp. 6-21).
- CAPRAZ, O.; MERAN, C.; WÖRNER, W.; GUNGOR, A. Using AHP and TOPSIS to evaluate welding processes for manufacturing plain carbon stainless steel storage tank. **Archives of Materials Science**. 2015; 76(2): 156-162.
- CONOVER, W. J.; IMAN, R. L. On multiple-comparisons procedures. **Los Alamos Sci. Lab. Tech. Rep.** LA-7677-MS, p. 1-14, 1979.
- CORRÊA, A. de C.; PEREIRA, C. A. B.; ASSUNÇÃO, P. D'A. C.; CORRÊA, D. C. G.; LEÃO, C. C. de S.; PEIXOTO, A. L. **Pesos de atributos com base em ordenações para comparação de processos de soldagem em aço inoxidável**. In: 72nd ABM Annual Congress, São Paulo, p. 807-816, 2017.
- CRUZ, JR.; CABRAL, T. S. Especificação de Procedimentos de Soldagem MIG para o Preenchimento de Cavidades pela Técnica de Camadas Sucessivas. 2008.

DAS NEVES, M. D. M. Solidificação da Zona de Fusão na soldagem do AISI 304 com Inconel 600 por laser de Nd: YAG. **Soldagem Insp.** São Paulo 14 (2009): 104-113.

DAVID S. A.; BABU S. S. Mathematical Modelling of Weld Phenomena 3, ed H Cerjak and H K D H BHADSHIA (London: The Institute of Materials), 1997, pp. 151–80.

DE SOUZA E., M.; PARANHOS, R. Avaliação metalúrgica da soldagem de revestimento inox austenítico sobre aço SAE 4130. **Soldagem & Inspeção**, v. 19, n. 4, p. 11, 2014.

PEREIRA, S.; APICELO, P. **Efeito da energia de soldagem na microestrutura de um aço inoxidável duplex e super duplex**. 2009. Dissertação (Mestrado)–Universidade Estadual do Norte Fluminense Darcy Ribeiro (UENF), Campos dos Goytacazes/RJ.

DOBIGNIES, A. A. **Estudo do rendimento de deposição de material na soldagem MIG/MAG em condições de transferência metálica por curto-circuito forçado**. 2008.

FÁVERO, L. P. et al. **Análise de dados: modelagem multivariada para tomada de decisões**. Rio de Janeiro: Elsevier, 2009.

FOX, John; WEISBERG, Sanford. An {R} Companion to Applied Regression, Second Edition. Thousand Oaks. CA: **Sage**, 2011. Disponível em: <http://socserv.socsci.mcmaster.ca/jfox/Books/Companion>.

FREDRIKSSON, metalurgical transactions A, vol.3, p. 2989,1972.

GALEAZZI, D. **Análise de propriedades mecânicas de uma junta soldada de aço inoxidável martensítico AISI 410** [trabalho de conclusão de curso]. Panambi: Unijuí, Curso de Engenharia Mecânica, Departamento de Ciências Exatas e Engenharias, 2016.

HINES, W. W.; MONTGOMERY, D. C.; GOLDSMAN, D. M. **Probabilidade e estatística na engenharia**. 4. ed. Rio de Janeiro: Grupo Gen-LTC. 2006.

HWANG, C. L.; YOON, K. **Multiple Attribute Decision Making: methods and applications**. New York: Springer-Verlag; 1981.

JAHAN, A.; EDWARDS, K. L.; BAHRAMINASAB, M. **Multi-criteria decision analysis for supporting the selection of engineering materials in product design**. Butterworth-Heinemann, 2016.

JAHAN, A.; MUSTAPHA, F.; ISMAIL, M. Y.; SAPUAN, S. M.; BAHRAMINASAB, M. A comprehensive VIKOR method for material selection. **Materials & Design**. 2011.

MACHADO, I. G. **Soldagem e Técnicas Conexas – Processos**. Porto Alegre: Editora UFRS, 1996.

KOBAYASHI, YUKIO, ANASTACIO A CSA , N C. **Estudo da Influência da Corrente de Curto Circuito, Através da Indutância, Sobre as Características Geométricas e Rendimento Real de Deposição**. Unesp-Campus de Bauru, Cobef: 2002.

MARQUES, V. P.; MODENESI, P. J.; BRACARENSE, A. Q. **Soldagem. Fundamentos e Tecnologia**. 2. ed. Belo Horizonte: Editora UFMG; 2007.

MODENESI, P. J. **Estimativa de Custos em Soldagem**. Belo Horizonte: UFMG; 2001.

MODENESI, P. J. **Técnica operatória da soldagem saw**. Belo Horizonte: Editora UFMG; 2012.

NASCIMENTO, A. S. do. **Fenomenologia da soldagem MIG/MAG-PV e sua aplicabilidade para juntas sobreposta e em V (passe de raiz)**. 2011.

OLSON, D. L. ASM handbook: welding, brazing, and soldering. 9 ed. **Asm Intl**, 6; 1983, p. 647-671.

PLANCKAERT, J. Modeling of MIG/MAG welding with experimental validation using an active contour algorithm applied on high speed movies. **Applied Mathematical Modelling**. 2009.

POHLERT, Thorsten. **The Pairwise Multiple Comparison of Mean Ranks Package (PMCMR)**. R package, 2014. Disponível em: <https://CRAN.R-project.org/package=PMCMR>.

R DEVELOPMENT CORE TEAM (2018). **R: a language and environment for statistical computing**. Vienna, Austria: R Foundation for Statistical Computing. ISBN 3-900051-07-0, Disponível em: <http://www.R-project.org>.

ROSZKOWSKA, E. Rank Ordering Criteria Weighting Methods – a comparative overview Optimum. 2013. *Studia Ekonomiczne*.

SHYJITH, K.; ILANGKUMARAN, M.; KUMANAN S. Multi-criteria decision-making approach to evaluate optimum maintenance strategy in textile industry. **Journal of Quality in Maintenance Engineering**. 2008.

STATNIKOV, R.; MATUSOV, J.; STATNIKOV, A. Multicriteria Engineering Optimization Problems: statement, solution and applications. **Journal of Optimization Theory and Applications**. 2012.

VAIDOGAS, E. R.; ZAVADSKAS, E. K.; TURSKIS, Z. Reliability measures in multicriteria decision making as applied to engineering projects. **International Journal of Management and Decision Making**. 2007.

ZAVADSKAS, E. K.; KAKLAUSKAS, A. **Pastatų sistemotechninis įvertinimas (Multi criteria evaluation of buildings)**. Vilnius: Technika, 275p., 1996.

ZIELINSKA, S. Microstructural analysis of the anode in gas metal arc welding (GMAW). **Journal of materials processing technology**. 2008.