



Testes de Soldadura MIG Standard e CMT Pulsado Robotizada em Liga de Alumínio 6082-T6 para Otimização de Penetração, Largura de Cordão e Reforço

Vinícius Augusto Mantelo Cecilio

Relatório da Dissertação Final apresentada à

Escola Superior de Tecnologia e Gestão

Instituto Politécnico de Bragança

para obtenção do Grau de Mestre em

Engenharia Industrial

Área de especialização em Engenharia Mecânica

Este trabalho foi efetuado sob orientação de:

João Eduardo Pinto Castro Ribeiro

Laercio Javarez Junior

José Alexandre de Carvalho Gonçalves

Setembro de 2017

AGRADECIMENTOS

À Universidade Tecnológica Federal do Paraná, em especial o campus Ponta Grossa, onde realizei a maior parte de minha graduação, à Escola Superior de Tecnologia e Gestão do Instituto Politécnico de Bragança, onde pude estudar pelo período de um ano através do acordo de dupla diplomação, à *Saint Martin's University* e à *Groove School of Engineering* da *City College of The City University of New York*, onde fui aluno beneficiário de bolsa de estudos do programa Ciência sem Fronteiras, financiado pela Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior (CAPES) – Brasil, por todo o conhecimento e amadurecimento adquirido. Em agradecimento também aos meus pais, Jaime e Gildete, minhas irmãs Josiane e Pollyanna, minha avó Vitorina e aos demais familiares. Aos professores, orientadores João Ribeiro, José Gonçalves e Laercio Javarez Junior, colegas de trabalho e amigos que me acompanharam e encorajaram durante essa etapa de minha vida.

“A escola deve ensinar a criança a continuar criança, mesmo depois de crescer”.

(Cristovam Buarque – O berço da desigualdade, 2005)

RESUMO

A necessidade de uma melhor eficiência energética tem levado à substituição de materiais mais pesados, como ligas ferro-carbônicas, por materiais mais leves como as ligas de alumínio e de magnésio na indústria. Apesar das vantagens destes materiais, existem desafios relacionados principalmente com os processos de fabricação, em especial a soldadura de ligas leves de alumínio. O presente trabalho aborda uma análise experimental de soldadura por arco elétrico com gás de proteção (GMAW) robotizada em liga de alumínio do tipo *Metal Inert Gas* (MIG) em suas variações de modo de transferência *Standard* e *Cold Metal Transfer* (CMT) pulsado, para otimizar a penetração, largura do cordão e reforço. A liga de alumínio 6082-T6 foi usada como metal base e como metal de adição a liga de alumínio 5754. Para o design do experimento (DOE) foi utilizado o método de matrizes ortogonais de Taguchi e estudada a influência de 12 parâmetros, com três níveis cada um. Cada combinação de parâmetros foi repetida três vezes de modo a aumentar o rigor científico e a significância estatística dos experimentos. Foram preparadas amostras e efetuadas medições com auxílio de microscópio. Para tratamento dos dados adquiridos houve utilização do filtro razão sinal-ruído que apontou o nível de melhor desempenho para cada parâmetro, e o método da análise de variância (ANOVA) apontou os parâmetros de maior influência para cada característica avaliada. Verificou-se que o parâmetro mais influente para a penetração do cordão foi o valor nominal do gás, independentemente do processo de transferência, enquanto que para a largura do cordão constatou-se uma diferença entre os modos de transferência, assim, para o modo de transferência *Standard*, o *slope 1* foi o parâmetro mais importante, e para o modo de transferência CMT Pulsado o valor nominal do gás novamente mostrou maior influência. Por fim, os resultados apontaram a combinação ótima de parâmetros para o cordão de solda. Testes de confirmação foram realizados em condições ótimas e avaliados. Com base nos resultados, concluiu-se que a metodologia confirmou sua eficácia. Entretanto, aconselha-se em alguns casos um maior número de iterações.

Palavras-chave: Soldadura MIG robotizada, soldadura de alumínio, MIG CMT pulsado, método de Taguchi.

ABSTRACT

The increasing need of a better energy efficiency is leading the substitution of some heavy materials like iron-carbon alloys by lighter materials as aluminum and magnesium alloys in the industry. Even though the advantages of these materials are clearly seen, there are still some challenges on its manufacturing processes, in special, the welding of aluminum light alloys. The present work is an experimental analysis of Gas Metal-arc Welding (GMAW) in aluminum alloy made by a robot, using Metal Inert Gas (MIG) in its transfer method variation Standard and Cold Metal Transfer (CMT) pulse, to optimize the penetration depth, width and reinforcement of the weld bead. The base metal was the aluminum alloy 6082-T6 and the filler metal was aluminum alloy 5754. For the design of experiment (DOE), Taguchi Orthogonal Arrays approach was used to observe the influence of 12 different parameters, with three levels each. Every combination of parameters was performed three times to increase the accuracy. The samples were prepared and the measurements made with microscope aid. Signal to noise filter was used to treat the data acquired from the experiments, and in sequence the analysis of variance (ANOVA) indicated the more influent parameters for each of the desired characteristics. It was verified that the most influent parameter for penetration was nominal gas value for both transfer methods, for the width though, they are dissimilar, for MIG standard, the slope 1 was the most important parameter, and for MIG CMT pulse the nominal gas value was the most influent again. By the end, the results pointed the optimal combination of parameters for the welded bead. Confirmation tests were performed in optimal conditions and evaluated. Based on the results, the method endorses its efficiency, however it requires more iterations for some cases.

Key-words: *Robotic MIG welding, aluminum welding, MIG CMT pulse, Taguchi method.*

ÍNDICE

AGRADECIMENTOS	iii
RESUMO	vii
ABSTRACT	ix
LISTA DE SÍMBOLOS	xiii
LISTA DE ACRÔNIMOS	xv
LISTA DE FIGURAS	xvii
LISTA DE TABELAS	xix
CAPÍTULO 1	21
1.1. INTRODUÇÃO.....	21
1.1.1. ENQUADRAMENTO.....	21
1.1.2. OBJETIVOS	23
1.1.3. ESTRUTURA	23
CAPÍTULO 2	25
2.1. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA	25
2.1.1. USO DE ROBÔS NA INDÚSTRIA	25
2.1.2. APLICAÇÕES DO ALUMÍNIO E SUAS LIGAS	26
2.1.3. PROCESSOS DE JUNÇÃO	27
2.1.4. SOLDADURA.....	27
2.1.4.1. SOLDADURA MIG	28
2.1.4.2. PARÂMETROS E CARACTERÍSTICAS DESEJÁVEIS.....	29
2.1.4.3. AJUSTES DE PROCESSAMENTO	31
2.1.5. CLASSIFICAÇÃO DOS ALUMÍNIOS E SUAS LIGAS	33
2.1.6. ANÁLISE MACROGRÁFICA	34
2.1.7. MATRIZES ORTOGONAIS DE TAGUCHI	35
2.1.7.1. RAZÃO SINAL-RUÍDO	36
2.1.7.2. ANÁLISE DE VARIÂNCIA	38

CAPÍTULO 3	39
3.1. PROCEDIMENTO EXPERIMENTAL	39
3.1.1. MATERIAIS	39
3.1.2. MÉTODOS	40
3.1.2.1. SELEÇÃO DE MATERIAIS	41
3.1.2.2. PLANEJAMENTO DO EXPERIMENTO	41
3.1.2.3. PREPARAÇÃO EXPERIMENTAL	44
3.1.2.4. PROGRAMAÇÃO DO ROBÔ E FONTE DE SOLDA	46
3.1.2.5. PREPARAÇÃO DAS AMOSTRAS	49
3.1.2.6. MEDIÇÃO DAS AMOSTRAS	51
3.1.2.7. TRATAMENTO DOS DADOS	52
3.1.2.8. TESTES DE CONFIRMAÇÃO	53
CAPÍTULO 4	55
4.1. RESULTADOS	55
4.1.1. PENETRAÇÃO	55
4.1.2. LARGURA DE CORDÃO	62
4.1.3. REFORÇO	69
4.2. ANÁLISE E DISCUSSÃO	76
4.2.1. PENETRAÇÃO	76
4.2.2. LARGURA DE CORDÃO	78
4.2.3. REFORÇO	80
CAPÍTULO 5	83
5.1. CONCLUSÕES	83
5.2. PROPOSTAS PARA TRABALHOS FUTUROS	84
REFERÊNCIAS	87
ANEXO I – EXEMPLO DO CÓDIGO DO ROBÔ	93
ANEXO II – IMAGENS DO MICROSCÓPIO	99

LISTA DE SÍMBOLOS

- A – Pré-fluxo de gás
B – Pós-fluxo de gás
C – Velocidade de alimentação
D – Correção anti-adesão
E – Valor nominal do gás
F – Fator gás
G – Corrente inicial
H – *Slope 1* – Inclinação 1
I – Corrente final
I_e – Corrente final
I_s – Corrente inicial
J – Tempo inicial
K – Tempo final
L – Largura de cordão; *Slope 2* – Inclinação 2
L₂₇(3¹³) – Matriz ortogonal de Taguchi com 27 experimentos, 3 níveis e 13 colunas
M1 – Medição 1
M2 – Medição 2
M3 – Medição 3
n – Número de observações
N1 – Nível 1
N2 – Nível 2
N3 – Nível 3
N_L, N_S, N_t – *Noise* – Ruído
 η_m – Média total da razão sinal-ruído
 $\hat{\eta}$ – Razão sinal-ruído ótima estimada
 $\bar{\eta}_i$ – Razão sinal-ruído média para o nível ótimo
P – Penetração
q – Número de parâmetros avaliados
R – Reforço
S – Sinal
S1 1 – *Slope 1* – Inclinação 1
S1 2 – *Slope 2* – Inclinação 2

s_y^2 – Variância de y

te – Tempo final

ts – Tempo inicial

y – Dados observados

\bar{y} – Média dos dados observados

\emptyset – Diâmetro

LISTA DE ACRÔNIMOS

ANOVA – *Analysis of Variance* – Análise de Variância

ANSI – *American National Standard Institute* – Instituto Nacional Americano de Normas

APSEHAL – Automatização de Processos de Soldadura em Estruturas Hiperestáticas de Alumínio

AWS – *American Welding Society* – Sociedade Americana de Soldadura

CAPES – Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior

CMT – *Cold Metal Transfer* – Transferência de Metal à Frio

DOE – *Design of Experiment* – Planejamento de Experimento

DOF – *Degrees of Freedom* – Graus de Liberdade

ESTiG – Escola Superior de Tecnologia e Gestão

GDL – Graus de Liberdade

GMAW – *Gas Metal-arc Welding* – Soldadura por Arco Elétrico com Gás de Proteção

IPB – Instituto Politécnico de Bragança

LE – Laboratório de Eletrotecnia

LTT – Laboratório de Tecnologia Térmica

MAG – *Metal Active Gas* – Soldadura por Arco Elétrico com Gás de Proteção Ativo

MIG – *Metal Inert Gas* – Soldadura por Arco Elétrico com Gás de Proteção Inerte

MOVC – *Circular Motion* – Movimento Circular

MOVJ – *Joint Motion* – Movimento de Menor Esforço Mecânico e Elétrico das Juntas

MOVL – *Linear Motion* – Movimento Linear

OFW – *Oxyfuel-gas Welding* – Soldadura a Gás Combustível

QM – Quadrados Médios

SMAW – *Shielded Metal-arc Welding* – Soldadura por Eletrodo Revestido

SN – *Signal-to-Noise Ratio* – Razão Sinal-Ruído

SQ – Soma dos Quadrados

TIG – *Tungsten Inert-gas* – Soldadura por Arco Elétrico com Gás de Proteção e Eletrodo Não Consumível de Tungstênio

UTFPR – Universidade Tecnológica Federal do Paraná

LISTA DE FIGURAS

Figura 1: Análise de viabilidade da estratégia de fabricação de acordo com o volume de produção [8].....	26
Figura 2: Perfil geométrico desejado na (a) união de junta soldada e (b) soldadura de revestimento [32].....	30
Figura 3: Curvas características de corrente [39]	32
Figura 4: Fixação dos provetes	45
Figura 5: Disposição dos cordões na placa.....	45
Figura 6: Posicionamento do sistema para soldadura.....	46
Figura 7: Sequência de soldadura.....	47
Figura 8: Trajetória do robô no plano.....	48
Figura 9: Formato de gota na ponta do arame	49
Figura 10: Cordão de solda antes e depois de escovado.....	49
Figura 11: Serra de mesa Struers Labotom	49
Figura 12: Amostras cortadas	50
Figura 13: Embutidora Struers LaboPress-1	50
Figura 14: Máquina de polir Struers LaboPol-25.....	51
Figura 15: Aspecto das amostras	51
Figura 16: Microscópio Veho VMS-005-LCD	51
Figura 17: Esquemático das medições das amostras	52
Figura 18: Média das medições dos experimentos para penetração.....	57
Figura 19: Razão sinal-ruído dos experimentos para penetração	57
Figura 20: Curva SN média de cada nível para MIG <i>Standard</i> para penetração	60
Figura 21: Curva SN média de cada nível para MIG CMT Pulsado para penetração....	60
Figura 22: Média das medições dos experimentos para largura.....	64
Figura 23: Razão sinal-ruído dos experimentos para largura	64
Figura 24: Curva SN média de cada nível para MIG <i>Standard</i> para largura	67
Figura 25: Curva SN média de cada nível para MIG CMT Pulsado para largura.....	67
Figura 26: Média das medições dos experimentos para reforço	71
Figura 27: Razão sinal-ruído dos experimentos para reforço.....	71
Figura 28: Curva SN média de cada nível para MIG <i>Standard</i> para reforço	74
Figura 29: Curva SN média de cada nível para MIG CMT Pulsado para reforço	74
Figura 30: Macrografia das amostras MIG <i>Standard</i>	100

Figura 31: Imagens refeitas MIG <i>Standard</i>	100
Figura 32: Testes de confirmação MIG <i>Standard</i>	100
Figura 33: Macrografia das amostras MIG CMT Pulsado	102
Figura 34: Testes de confirmação MIG CMT Pulsado.....	102

LISTA DE TABELAS

Tabela 1: Nomenclatura ANSI para alumínios e ligas	33
Tabela 2: Composição química das ligas em porcentagem em peso (wt%).....	34
Tabela 3: Fórmulas da razão sinal-ruído [55].....	37
Tabela 4: Parâmetros de trabalho	42
Tabela 5: Parâmetros e níveis para os experimentos de Taguchi	42
Tabela 6: Matriz L_{27} (3^{13}) de Taguchi	43
Tabela 7: Medições, média e razão sinal-ruído para penetração - MIG <i>Standard</i>	55
Tabela 8: Medições, média e razão sinal-ruído para penetração - MIG CMT Pulsado .	56
Tabela 9: Razão sinal-ruído média para os níveis dos parâmetros MIG <i>Standard</i> para penetração.....	58
Tabela 10: Razão sinal-ruído média para os níveis dos parâmetros MIG CMT Pulsado para penetração	59
Tabela 11: Níveis ótimos para penetração em MIG <i>Standard</i> e MIG CMT Pulsado	60
Tabela 12: Teste de confirmação MIG <i>Standard</i> para penetração	61
Tabela 13: Teste de confirmação MIG CMT Pulsado para penetração	61
Tabela 14: ANOVA para MIG <i>Standard</i> para penetração	61
Tabela 15: ANOVA para MIG CMT Pulsado para penetração.....	61
Tabela 16: Medições, média e razão sinal-ruído para largura de cordão - MIG <i>Standard</i>	62
Tabela 17: Medições, média e razão sinal-ruído para largura de cordão - MIG CMT Pulsado	63
Tabela 18: Razão sinal-ruído média para os níveis dos parâmetros MIG <i>Standard</i> para largura de cordão	65
Tabela 19: Razão sinal-ruído média para os níveis dos parâmetros MIG CMT Pulsado para largura de cordão	66
Tabela 20: Níveis ótimos para largura de cordão em MIG <i>Standard</i> e MIG CMT Pulsado	67
Tabela 21: Teste de confirmação MIG <i>Standard</i> para largura de cordão	68
Tabela 22: Teste de confirmação MIG CMT Pulsado para largura de cordão.....	68
Tabela 23: ANOVA para MIG <i>Standard</i> para largura de cordão.....	68
Tabela 24: ANOVA para MIG CMT Pulsado para largura de cordão.....	68
Tabela 25: Medições, média e razão sinal-ruído para reforço - MIG <i>Standard</i>	69

Tabela 26: Medições, média e razão sinal-ruído para reforço - MIG CMT Pulsado	70
Tabela 27: Razão sinal-ruído média para os níveis dos parâmetros MIG <i>Standard</i> para reforço.....	72
Tabela 28: Razão sinal-ruído média para os níveis dos parâmetros MIG CMT Pulsado para reforço.....	73
Tabela 29: Níveis ótimos para reforço em MIG <i>Standard</i> e MIG CMT Pulsado	74
Tabela 30: Teste de confirmação MIG <i>Standard</i> para reforço	75
Tabela 31: Teste de confirmação MIG CMT Pulsado para reforço	75
Tabela 32: ANOVA para MIG <i>Standard</i> para reforço	75
Tabela 33: ANOVA para MIG CMT Pulsado para reforço	75

CAPÍTULO 1

1.1. INTRODUÇÃO

O setor empresarial vem gradativamente se tornando mais desafiador. Nesse meio dinâmico e competitivo, é necessário sempre mostrar um diferencial em relação aos concorrentes. Se adequar rapidamente as adversidades e ao cenário de constante mudança é quesito fundamental para a sobrevivência das empresas na atualidade, o que se torna ainda mais acentuado quando se trata de empresas ligadas ao setor de tecnologia. Junto as indústrias, as universidades têm papel crucial no desenvolvimento de inovações e seu uso com responsabilidade, já que é a principal responsável pela formação do material humano desenvolvedor e beneficiário dessas tecnologias.

Quando se fala em iniciativa privada, o retorno aos investimentos é essencial. Visando a redução dos custos de fabricação para conseqüentemente aumentar o lucro, a substituição da mão de obra humana em atividades repetitivas é uma prática bastante usual. Quando se deseja flexibilidade numa fábrica, o robô mostra determinada versatilidade em relação a automação rígida, porém, geralmente com uma produtividade inferior [1]. Os riscos aos quais o soldador é exposto também fazem com que a automação do processo de soldadura seja altamente atrativa e vantajosa.

No caso específico das soldaduras, é ainda um desafio controlar o processo por completo. Isso resulta numa grande variabilidade na produção, e como consequência, uma alta taxa de defeitos e, em alguns casos, retrabalho, que aumentam o custo final do produto. Sendo esse conjunto de fatores a principal motivação para esforços na pesquisa e desenvolvimento para a completa compreensão do processo de solda.

1.1.1. ENQUADRAMENTO

Embora o estudo apresentado seja independente, este foi realizado de forma a cooperar voluntariamente com o projeto Portugal 2020 “APSEHAL: Automatização de Processos de Soldadura em Estruturas Hiperestáticas em Ligas de Alumínio” [2]. Como previsto na concepção do projeto firmado entre a empresa Roboplan e o Instituto Politécnico de Bragança, visa a substituição dos materiais metálicos convencionais por ligas mais leves e com características mecânicas similares.

A alternativa mais usual na indústria para automatização de soldaduras é a robotização, principalmente pela capacidade dos robôs industriais de desempenharem diferentes tarefas, sendo necessário apenas a programação de um novo código, compatível com o trabalho a ser executado e não a substituição de todo o maquinário e ferramental da fábrica.

Soldaduras são largamente utilizadas para a fabricação de elementos estruturais que são inviáveis de serem fabricados em peça única. Essa combinação entre elementos estruturais e o processo de soldadura exige atenção especial, principalmente para o caso de estruturas hiperestáticas, onde distorções e tensões residuais provenientes do processo de fabrico podem causar falha prematura da estrutura. Ligas de alumínio são ainda mais suscetíveis a esses inconvenientes.

O desenvolvimento e aprimoramento das técnicas de soldagem robotizada são extremamente estratégicos para a indústria de transportes, com ênfase nas linhas de montagem da indústria automobilística [1], que é a maior utilizadora de robôs industriais e tem nos chassis de automóveis o principal exemplo de estrutura hiperestática.

As estruturas fabricadas pela indústria de transportes, como os chassis de automóveis leves e pesados, vagões de trem e quadros de bicicletas por exemplo, estão sempre ligadas a um consumo de energia, o que em contrapartida com o agravamento de algumas dificuldades provenientes do processo de fabricação, viabilizam a substituição de ligas ferrosas tradicionais devido ao aumento da eficiência energética e melhora no desempenho.

O projeto APSEHAL, indo de encontro com o cenário exposto, consiste em analisar numérica e experimentalmente todo o processo, sendo que aqui é apresentada apenas uma etapa do que é proposto no acordo. A participação no período de arranque das atividades permitiu a realização do planejamento dos experimentos e também a participação na parte inicial dos testes experimentais de avaliação macrográfica da geometria do cordão soldado.

Como definido nas diretrizes do acordo [2], o objetivo é encontrar os parâmetros ideais para a soldadura robotizada de liga de alumínio principalmente para o caso de estruturas hiperestáticas. O foco deste trabalho é a otimização das características geométricas do cordão das juntas soldadas, buscando maneiras de dispensar a alta sensibilidade do operador ao processo, requerida até então, porém sem elevar em demasia os custos de fabricação.

1.1.2. OBJETIVOS

A pesquisa tem cunho experimental, tendo por objetivo principal alcançar a combinação ótima de parâmetros, resultando no melhor cordão soldado em liga de alumínio para a penetração, largura de cordão e reforço, utilizando a técnica de soldadura por arco elétrico com gás de proteção MIG com diferentes processos de transferência de material de adição, designados por *Standard* e CMT Pulsado. O objetivo secundário é quantificar a influência da variação dos parâmetros individualmente na qualidade de um cordão soldado por robô, de modo a garantir uma repetibilidade segura e economicamente viável dos testes de soldadura sem comprometer as propriedades mecânicas dos componentes nas junções e reduzir a ocorrência e gravidade de defeitos. A ambientação com a utilização de técnicas de otimização utilizadas na indústria, o contato prático e o manuseio de equipamentos e máquinas também foi buscado ao longo do desenvolvimento do trabalho.

1.1.3. ESTRUTURA

Fundamentado nas Normas Regulamentares dos Mestrados do Instituto Politécnico de Bragança, o trabalho apresenta seguidamente os elementos pré-textuais, textuais e pós-textuais. Os elementos pré-textuais são os agradecimentos, a frase ou pensamento, e uma visão geral do trabalho em forma de resumo de tudo o que foi realizado no trabalho em língua portuguesa e em língua estrangeira. Estes estão seguidos do índice, lista de figuras e lista de tabelas, todas com função de facilitar a leitura e busca por informações específicas no trabalho.

Os elementos textuais estão divididos em cinco capítulos, sendo o primeiro deles responsável por apresentar a introdução do trabalho, um enquadramento deste dentro do projeto da indústria no setor de soldaduras robotizadas e a significância de tal estudo, os objetivos do trabalho e a explicação de como o trabalho foi estruturado. O segundo capítulo apresenta a revisão bibliográfica, que busca embasar teoricamente todos os conceitos utilizados durante a realização da pesquisa de acordo com o que já se conhece e já foi validado pela comunidade científica, no intuito de facilitar a compreensão do texto. O terceiro capítulo explica como foram realizados os experimentos desde a sua concepção e os materiais que foram necessários para se atingir os resultados, detalhando o design do experimento, as hipóteses assumidas, o método de experimentação, as técnicas, os materiais e equipamentos utilizados. No capítulo quatro são apresentados os

resultados, e a análise e discussão dos mesmos. O último e quinto capítulo, apresenta as conclusões alcançadas através da interpretação dos dados obtidos após todas as etapas e futuros trabalhos foram propostos caso seja de interesse continuar a desenvolver estudos na área.

Finalmente, nos elementos pós-textuais foram apresentadas todas as obras e autores que contribuíram para o embasamento. Toda a documentação complementar considerada relevante encontram-se no último item em forma de anexos.

CAPÍTULO 2

2.1. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

Neste capítulo será apresentado uma revisão bibliográfica dos temas abordados, expondo conceitos teóricos importantes para a compreensão do trabalho, confrontando produções recentes relacionadas aos objetos de estudo com obras de autores conceituados e já validados. Também serão apresentadas informações presentes em manuais dos equipamentos e catálogos de fabricante consideradas relevantes.

2.1.1. USO DE ROBÔS NA INDÚSTRIA

O aumento da produtividade a nível industrial exigiu a implantação de robôs como ferramenta de automatização de tarefas, a fim de otimizar tempo e custos [3]. Tal fato vem crescendo de forma exponencial nos últimos anos [4]. Essa realidade traz como consequência, maior agregação da robótica nesse nicho de mercado, e, além disso, tornam robôs peças fundamentais dentro das indústrias [5].

O uso de robôs industriais apresenta-se como solução para a produtividade e flexibilidade, principalmente quando é percebida a escassez e o alto custo de profissionais capacitados [6]. Robôs vem sendo empregados na realização de tarefas como soldagem, usinagem, transporte, montagem, pintura, entre outras.

Entretanto, deve-se considerar que para usufruir da automação robotizada dentro da indústria é interessante ponderar a relação do custo unitário e o volume de produção para as três estratégias básicas de fabricação, as quais são nomeadamente: manual, sistemas flexíveis (robotização) e automação rígida [1, 7].

Pode-se analisar, de acordo com a figura 1, que a automação flexível e robôs é a estratégia mais recomendada para volumes médios de produção. Todavia, caso o volume de produção alcançar a casa de centenas de milhares anuais, indica-se que se faça uso da automação rígida, como forma de reduzir o custo unitário de fabricação.

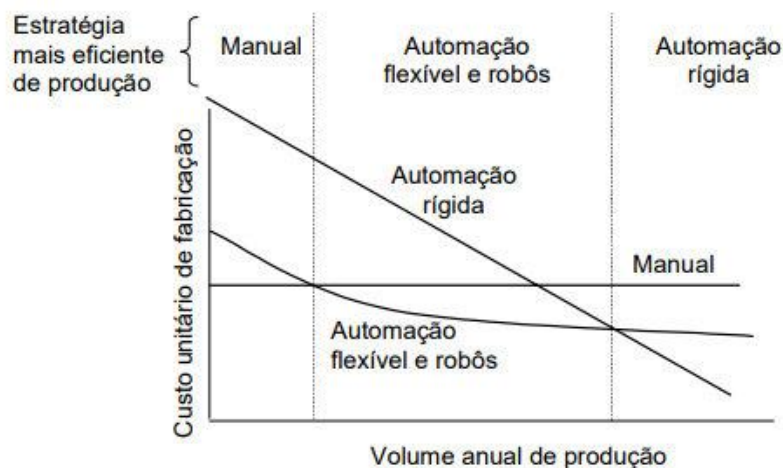


Figura 1: Análise de viabilidade da estratégia de fabricação de acordo com o volume de produção [8]

Processos de soldadura estão entre os mais utilizados na indústria [9], e os parâmetros devem ser muito bem estabelecidos para qualquer tipo de sistema de robotização, assegurando a obtenção de uma solda de qualidade [10]. Apesar de todo o interesse, as técnicas de soldagem ainda não são completamente compreendidas e são utilizadas de acordo com conhecimentos empíricos, assim como os conhecimentos em robótica não são comuns a operadores de máquinas convencionais [1].

2.1.2. APLICAÇÕES DO ALUMÍNIO E SUAS LIGAS

O desenvolvimento de novos materiais, visando melhorias de desempenho e redução de custos de fabricação e operação, vem se acentuando e com isso a substituição dos materiais convencionais. No setor mecânico, as ligas ferrosas são as mais utilizadas e estão sendo gradualmente substituídas por compósitos, ligas de magnésio e ligas de alumínio, os quais apresentam boas propriedades mecânicas e elevada resistência à corrosão atmosférica, além de menor densidade [11, 12, 13, 14].

As ligas de alumínio vêm ganhando destaque devido ao preço inferior e processo de fabricação mais simples em comparação com outros materiais de características semelhantes. Justificando assim, a crescente utilização desses materiais na indústria aeroespacial, automobilística, ferroviária, naval [15] e também na construção de pontes, vasos de pressão e dutos [16].

O emprego das ligas de alumínio se dá principalmente quando o peso da estrutura é crucial em detrimento do preço, que ainda é superior ao dos aços e ferros fundidos. Partindo desse pressuposto, a indústria de transportes, principalmente no setor automobilístico, vem sendo a maior beneficiária do uso dessa propriedade de baixa

densidade, que se reflete em uma economia de até 30% no consumo energético e consequente diminuição na emissão de poluentes [17]. Ainda na esfera ambiental, as ligas de alumínio são facilmente recicláveis [2].

O alumínio apresenta alguns empecilhos no que se refere a obtenção de uma soldadura bem-sucedida, a qual depende da técnica aplicada para desagregar a camada de óxido superficial, que se mantém estável, mesmo após a fusão do alumínio. Essa camada de óxido superficial é resultado da reação do alumínio com o gás atmosférico e sua principal vantagem é garantir a proteção do metal contra a corrosão, contudo, eleva seu ponto de fusão, dificultando assim, a realização de uma boa soldadura [15, 18]. Uma outra limitação importante das ligas de alumínio é sua baixa resistência à fadiga, quando comparada com as ligas ferro-carbônicas [19]. Esta restrição pode inviabilizar a sua utilização em alguns componentes que estão sujeitos a esforços variáveis ao longo do tempo.

Na indústria de transportes, muitos elementos correspondem a estruturas hiperestáticas de elevada rigidez, que ao serem submetidas às tensões residuais oriundas da soldadura, poderão provocar fissuração [20] ou empenos da estrutura [13]. Exemplos dessas estruturas são os chassis de automóveis e os quadros de bicicletas.

2.1.3. PROCESSOS DE JUNÇÃO

É muito comum no momento da fabricação de componentes, que estes sejam fabricados em partes, ou seja, fazem-se várias peças que depois são montadas ou juntadas das mais diversas maneiras, de acordo com as necessidades da aplicação. Mesmo produtos muito simples, por vezes, podem ser impossíveis de serem fabricados como uma única peça. São vários os métodos de unir peças, os chamados métodos de junção ou fixação, que podem ser permanentes ou não permanentes. A fixação mecânica, adesiva e a soldadura são as três principais categorias de junção [21].

Exemplos de junções por fixação mecânica são os parafusos, porcas e rebites, e para a fixação adesiva temos as colas e resinas, e por último a soldadura, que une matérias normalmente de mesma natureza, através de calor, havendo ou não a fusão do material.

2.1.4. SOLDADURA

A soldadura é definida pela Sociedade Americana de Soldadura (AWS – *American Welding Society*) [22] como “a técnica de reunir duas ou mais partes constitutivas de um

todo, assegurando entre elas a continuidade geométrica, as características mecânicas, metalúrgicas e químicas do material”. Especificamente falando da soldadura por fusão, Kalpakjian & Schmid [21] define como sendo a “técnica de fundir e coalescer materiais por meio de calor, geralmente fornecido por meios químicos ou elétricos, podendo ou não usar materiais de adição”. Existem também a soldadura em estado sólido e outras técnicas como soldagem e brasagem.

Há vários processos de soldadura por fusão, e ainda uma infinidade de variações em torno destes. Dentre os mais comuns podem ser citados a soldadura a gás combustível ou (OFW – *Oxyfuel-gas Welding*), onde a fonte de calor é uma chama, e entre os que a fonte de calor é elétrica mais usados podemos citar a soldadura por eletrodo revestido (SMAW – *Shielded Metal-arc Welding*), a soldadura TIG (TIG – *Tungsten Inert-gas*), e a soldadura MIG/MAG (MIG/MAG – *Metal Inert Gas/Metal Active Gas*).

2.1.4.1. SOLDADURA MIG

Também chamada de GMAW (*Gas Metal-arc Welding*), a soldadura MIG foi utilizada na experimentação deste trabalho devido ser uma das técnicas de soldadura de mais fácil automatização e ser também a mais compatível com o material utilizado.

O método é ainda chamado de semi-automático, devido à alimentação automática de fio através do bocal, de onde também são projetados os gases [10, 23]. O calor para a fusão do eletrodo provém do arco elétrico, esta ocorre sob proteção de gás, que evita a contaminação da solda por gases atmosféricos [1]. O calor é concentrado no arco elétrico da ponta do eletrodo até a poça de fusão e também no metal que está sendo transferido [10].

O que diferencia a soldadura MIG da soldadura MAG é basicamente o gás de proteção, onde na primeira o gás é inerte, geralmente gás argônio ou uma mistura de argônio com hélio, e na segunda o gás é ativo, ou seja, este interage com a poça de fusão, sendo comum o emprego do dióxido de carbono. A principal função do gás é proteger o metal do contato com os gases atmosféricos, que são prejudiciais ao processo.

A soldadura MIG/MAG tem diferentes modos de transferência de material de adição sendo, classicamente, conhecidos por modo de *spray* e por curto circuito. Tipicamente o modo de transferência por *spray* é utilizado no processo MIG enquanto o curto circuito é mais usual no processo MAG. No presente trabalho optou-se por utilizar

a designação *MIG Standard* à transferência de material por spray, uma vez que é a designação indicada pelo fabricante do equipamento de soldadura usado.

Além do método convencional de soldadura MIG, neste trabalho foi utilizado um híbrido das variações MIG pulsado e o MIG CMT (*Cold metal transfer*). Trata-se de processos que utilizam sistemas de controle eletrônico e mecânico para monitorar e controlar a intensidade da corrente durante a transferência metálica [24]. Estes e muitos outros estão ainda em fase de estudo e desenvolvimento.

No método pulsado, foi inserido ao método convencional uma oscilação na corrente semelhante a uma onda retangular, o que dentro de um intervalo afiançado impede o fechamento do arco elétrico e permite controlar a transferência de material a cada pulso [25]. Algumas vantagens do método pulsado são o maior controle dimensional da poça de fusão, a boa penetração, a uniformidade de cordão, as altas velocidades de soldagem, a alta taxa de deposição de metal e as menores probabilidades de defeitos como distorção, porosidade, etc. [26].

A inovação inserida ao processo pela tecnologia CMT está basicamente no movimento do arame de deposição durante a soldadura, que antes era alimentado continuamente e agora através de um controlador digital experimenta ciclos de avanço e retração [24], que atuam principalmente diminuindo a carga térmica no material, o que explica o nome “transferência de metal frio”, não pela transferência literalmente a frio, mas pelas temperaturas relativamente baixas em relação aos métodos convencionais [27]. Frequências altas impostas pelo controlador na alimentação do fio aumentam os respingos, porém melhoram o preenchimento das juntas [28].

As principais vantagens do CMT são devidas às faixas de temperatura mais baixas que reduzem significativamente respingos e as tensões residuais, distorções, trincas entre outros. A soldadura CMT é muito indicada para ligas não ferrosas, como, por exemplo, as ligas de alumínio [29].

O método MIG CMT Pulsado une a oscilação da corrente de soldagem com a movimentação do arame, permitindo maior controle sobre o processo de deposição de material.

2.1.4.2. PARÂMETROS E CARACTERÍSTICAS DESEJÁVEIS

Um cordão de solda classificado como bom, atende os requisitos da sua aplicação, produtividade e custos. Os parâmetros selecionados para a operação de soldadura são

determinantes para a qualidade da junta soldada [9]. As características de qualidade variam, porém o que se espera é que uma junta soldada seja a mais homogênea possível em termos de propriedades mecânicas, químicas e geométricas [26].

Um bom exemplo de diferentes aplicações pode ser visto na figura 2, onde é feita uma comparação da geometria desejada em um cordão de solda para união de juntas, e em uma soldadura de revestimento. A letra P indica penetração, L a largura do cordão e R o reforço. A primeira tem como principal função unir partes e a segunda garantir proteção superficial ao componente. Ligas de níquel [30, 31] e aços inoxidáveis [32] são muito utilizadas para revestir componentes.

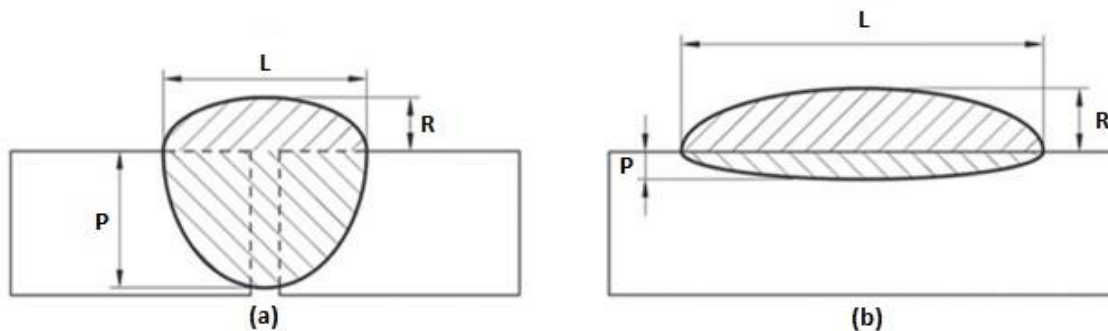


Figura 2: Perfil geométrico desejado na (a) união de junta soldada e (b) soldadura de revestimento [32]

Na soldadura por arco elétrico, os parâmetros mais importantes que influenciam na qualidade do cordão são a corrente, a tensão e a velocidade de soldagem [9]. Um arco perfeito pode ser atingido quando todos os parâmetros estão em conformidade. Entretanto, devido à complexidade do processo e à grande quantidade de parâmetros, muitos deles são negligenciados na maioria dos casos.

A corrente elétrica acompanha a velocidade de alimentação do fio, sendo que, para uma maior quantidade de material, é necessária uma corrente maior para fundir o material, influenciando principalmente na penetração. A tensão é fortemente ligada à geometria do cone do arco elétrico, e quanto mais alta, também maiores são as dimensões da poça de fusão e, conseqüentemente, a largura do cordão, e menor o reforço. Quanto menor a velocidade de avanço, maior a penetração, devido ao tempo mais longo de transferência de calor localizado e maior tempo de solidificação [33].

Diferentes larguras de solda exigem diferentes profundidades de penetração, para evitar defeitos de não penetração ou penetração incompleta. Maior penetração resulta de uma maior quantidade de calor inserida ou a uma redução da velocidade de soldagem, aumentando a zona termicamente afetada e reduzindo a variação da temperatura nas regiões próximas do cordão. Aumentando a profundidade de penetração ou quantidade

de calor inserido na soldagem filete, a tensão residual diminui próximo da junta [34, 35, 36].

O gás de proteção também interfere nas características do cordão devido ao papel desempenhado nas trocas térmicas, embora sua principal função seja evitar defeitos como a porosidade, que é um dos problemas das soldas em ligas de alumínio devido a alta solubilidade do hidrogênio no alumínio fundido [37]. Para ligas de alumínio, o argônio puro ou misturas com hélio são as opções mais comuns [34, 35, 36].

Alguns autores utilizam o termo soldabilidade para se referir a aptidão de um material a passar pelos processos de soldadura, levando em conta fatores como alterações metalúrgicas, variações da dureza, resistência a cargas e a corrosão e propensão à ocorrência de defeitos como trincas, descontinuidades em geral e distorções [38].

2.1.4.3. AJUSTES DE PROCESSAMENTO

Os chamados de ajustes primários, como a corrente, tensão e velocidade de soldadura, entre outros parâmetros mais tradicionais, foram mantidos constantes de modo a permitir a investigação do efeito de ajustes finos na qualidade do cordão de solda.

Os 12 parâmetros foram escolhidos dentre os ajustes de processamento do *software* da máquina fonte de solda *Fronius Xplorer* sendo: pré-fluxo de gás, pós-fluxo de gás, velocidade de alimentação, correção anti-adesão, valor nominal do gás, fator gás, corrente inicial, *slope 1*, corrente final, tempo inicial, tempo final e *slope 2* [39].

O gás de proteção é indispensável na soldadura MIG e, ainda mais determinante no caso da soldadura de alumínio, visto que ajuda a quebrar a camada de óxido que protege a superfície do material, considerada um empecilho ao processo. Para melhorar a eficiência da soldadura, o fluxo deste deve ser iniciado momentos antes da abertura do arco (pré-fluxo de gás) e ser interrompido instantes depois do fechamento do arco (pós-fluxo de gás), protegendo a poça de fusão ainda não solidificada do contato com gases atmosféricos que podem causar defeitos e falhas.

O valor nominal do gás é o valor da vazão volumétrica de gás de proteção em litros por minuto despejado pelo controlador digital de gás. Outro ajuste diretamente ligado a este parâmetro é o fator gás, um fator de correção para quando é utilizado outro gás de proteção que não o programado de fábrica para o material adicional selecionado [39].

A velocidade de alimentação está relacionada com a velocidade à qual o arame se move dentro do conduíte nos momentos onde não está sendo realizada a soldadura,

quando é necessário que o arame avance ou recue. No caso do alumínio é interessante que as velocidades sejam menores do que para materiais mais duros como o aço inox, garantindo a preservação dos tubos de teflon e evitando mudanças de propriedades do material de adição, como por exemplo, endurecimento por trabalho a frio.

A correção anti-adesão é um mecanismo que tem por objetivo evitar que o arame adira à poça de fusão no final da soldadura e, fisicamente, é expresso pelo tempo em décimos de segundo, entre a parada do avanço do arame e a parada da corrente no final da soldagem. Valores positivos para a correção anti-adesão significam que a alimentação do arame é interrompida antes da corrente e, valores negativos que a corrente é interrompida e o arame continua a correr. O uso de valores positivos altos implica no aumento do comprimento de arco e pode, por isso, danificar a tocha, por outro lado, o uso de valores muito negativos pode fazer com que o arame fique preso à peça e esta seja arrancada no momento em que o robô se afasta.

Visando a otimização do trabalho de soldadura, a fonte de solda apresenta curvas características que podem ser programadas de acordo com o interesse do operador. A corrente inicial, o tempo inicial, o *slope* 1, a corrente final, o tempo final e o *slope* 2, são programados através desta curva com eixo das abscissas apontando o tempo em segundos e o eixo das ordenadas o percentual da corrente em Ampère, onde 100% equivale à corrente de soldagem programada, assim como, na curva que pode ser vista na figura 3.

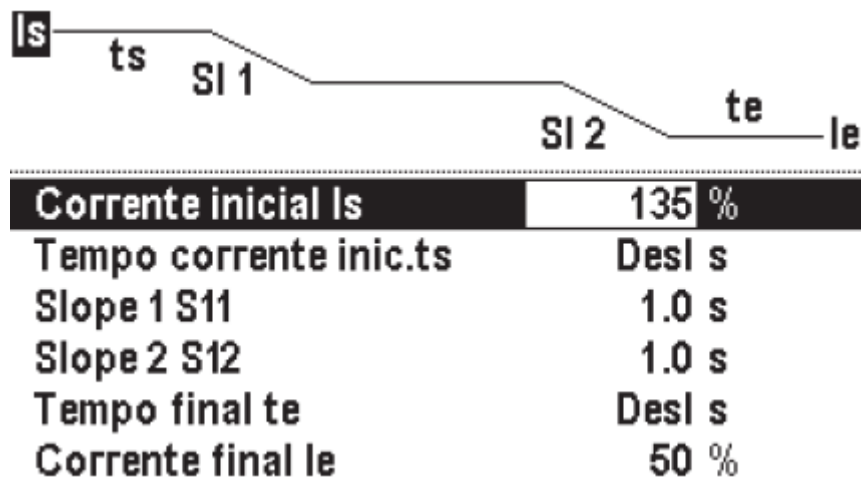


Figura 3: Curvas características de corrente [39]

No momento de abrir o arco de solda, para vencer a camada protetora de óxido, é conveniente para o processo que a corrente seja mais elevada e depois de aberto o arco, que seja reduzida gradualmente. No *software*, a corrente inicial pode ser programada através de uma porcentagem em relação a corrente de solda. O tempo inicial refere-se ao

tempo em que a corrente inicial fica acionada e o *slope 1*, corresponde à primeira inclinação da curva característica medida em segundos, ou seja, o tempo que leva para ocorrer a transição entre a corrente inicial para a corrente de solda.

De maneira semelhante, no momento de término de solda, é conveniente que a corrente seja reduzida, devido ao material já apresentar uma temperatura mais elevada do que no começo da solda e a barreira de óxido já ter sido vencida. O tempo final significa o tempo em que fica acionada a corrente final e o *slope 2* é a segunda inclinação da curva característica, que representa a transição entre a corrente de soldadura e a corrente final.

2.1.5. CLASSIFICAÇÃO DOS ALUMÍNIOS E SUAS LIGAS

O alumínio é um elemento químico metálico de número atômico 13, densidade 2.7 g/cm^3 e estrutura cristalina cúbica de face centrada, possui aspecto cinza prateado e fosco. Seu ponto de fusão e ebulição são respectivamente 933,47 K e 2792 K, seu calor específico é de 900 J/(Kg.K) e a condutividade térmica de 237 W/(m.K) . Tem uma excelente resistência à corrosão, condutividade térmica e elétrica e baixa densidade quando comparado com seus principais concorrentes, o ferro e o aço. O alumínio também se destaca pela versatilidade e facilidade de ser combinado com outros elementos formando ligas com aplicações diversas [40].

A norma mais utilizada para a nomenclatura das ligas de alumínio forjadas é a H35.1 que foi estipulada pela ANSI - *American National Standard Institute*, e é feita através de quatro dígitos, sendo o primeiro para identificar o grupo através do principal elemento de liga, tal como pode ver na tabela 1.

Tabela 1: Nomenclatura ANSI para alumínios e ligas

Grupo	Elemento
1xxx	Não ligado
2xxx	Cobre
3xxx	Manganês
4xxx	Silicone
5xxx	Magnésio
6xxx	Magnésio e Silício
7xxx	Zinco
8xxx	Estanho, Lítio e outros
9xxx	Reservado para uso futuro

Para ligas do grupo 1xxx, o segundo dígito igual a zero indica limites de impurezas naturais e os algarismos de 1 a 9 indicam controle especial de uma ou mais impurezas. Já para as ligas dos grupos 2xxx ao 8xxx, o segundo número sendo zero indica a liga original, números de 1 a 9 indicam modificações da liga original e os últimos dois dígitos são para identificar as diferentes ligas em um mesmo grupo.

As ligas de alumínio podem ser divididas entre passíveis ou não de tratamento térmico e/ou mecânico. A designação referente ao tratamento acompanha a designação referente aos elementos de liga separadas por hífen. As mais comuns são: “F” para as quais não é efetuado nenhum controle; “O” para recozidas; “H” para as endurecidas por trabalho a frio; “W” para as envelhecidas naturalmente após solubilização e “T” indica uma sequência de tratamentos que o material foi submetido [41]. No caso do T, este vem seguido de um número de 1 a 10, onde cada um representa uma sequência específica de tratamentos.

A composição química dos metais de base e de adição podem ser consultadas na tabela 2. Ambos apresentam um limite de 0,05 wt% de uma mesma impureza e limite total de impurezas e de 0.15 wt%.

Tabela 2: Composição química das ligas em porcentagem em peso (wt%)

	Si	Fe	Cu	Mn	Mg	Cr	Ni	Zn	Ga	V	Mn+Cr	Ti
Al 6082	0,7-1,3	0,5	0,1	0,4-1,0	0,6-1,2	0,25	-	0,2	-	-	-	0,1
Al 5754	0,4	0,4	0,1	0,5	2,6-3,6	0,3	-	0,2	-	-	0,1-0,6	0,15

2.1.6. ANÁLISE MACROGRÁFICA

O controle de qualidade de um produto metalúrgico pode ser estrutural e dimensional. O primeiro preocupa-se com o material que forma a peça, sua composição, propriedades, estrutura, aplicação, entre outros; enquanto o segundo busca o controle das dimensões físicas de um determinado produto, denominada metrologia [42].

Um ensaio macrográfico se refere a análises a olho nu ou com ampliação de até 50 vezes do aspecto de uma superfície após devidamente polida e atacada por um reagente adequado [42]. Por seu intermédio, tem-se uma ideia do conjunto, referente à homogeneidade do material, à distribuição e natureza das falhas, impurezas e ao processo de fabricação, qualidade de solda, profundidade de tratamentos térmicos entre outras características.

Quando é necessário particionar ou alterar características do corpo de prova para obter amostras é caracterizado o ensaio destrutivo. Operações mecânicas como

torneamento, aplainamentos e outras, impõem severas alterações microestruturais devido ao trabalho mecânico a frio. O corte abrasivo oferece a melhor solução para este seccionamento, pois elimina por completo o trabalho mecânico a frio, resultando em superfícies planas com baixa rugosidade, de modo rápido e seguro [42].

Depois do corte e embutimento das amostras, para evitar que o corpo de prova rasgue as lixas, e para garantir melhor planicidade das superfícies, é necessário o lixamento e polimento dos provetes, garantindo um acabamento superficial isento de marcas [42]. O último passo antes das medições é o ataque químico, onde a amostra é exposta a um reagente específico para aumentar o contraste entre as fases, que varia principalmente de acordo com a composição química, tempo e temperatura.

2.1.7. MATRIZES ORTOGONAIS DE TAGUCHI

A otimização de processos de fabricação deve considerar os muitos fatores que influenciam na qualidade do produto final. Para as soldaduras, esse pressuposto também é válido, visto que são processos complexos e regidos por inúmeras variáveis que introduzem uma grande quantidade de incertezas [26]. Desta forma, o método de Taguchi vem mostrando vasta aplicação e grande eficácia para otimização de processos de fabricação [9, 26, 30, 43-49].

Para melhorar a qualidade de produtos e processos, tem-se como meta comum a redução da variância diminuindo defeitos e retrabalho. O que também é comumente referido na literatura de engenharia da qualidade é o conceito de robustez, que se trata da capacidade de determinado produto ou processo ser insensível a influência de fatores externos de controle impraticável [45, 50]. O maior objetivo é encontrar fatores de entrada que minimizem a variação da resposta, ajustando ou mantendo o processo ao alvo. Produtos projetados dessa maneira apresentam performance mais consistente independente do meio em que é fabricado [9, 48].

O método das matrizes ortogonais de Taguchi leva esse nome devido ao seu desenvolvedor, o engenheiro e estatístico japonês Genichi Taguchi (1924-2012), tendo como motivação a aplicação dos estudos de Ronald Aylmer Fisher na área do planejamento de experimentos (DOE – *Design of experiments*). Suas principais vantagens são a possibilidade de uso sem grande conhecimento de estatística e matemática sofisticada e a coleta de um grande número de dados com custos reduzidos e pequeno número de experimentos. As matrizes ortogonais permitem aos engenheiros avaliar a

robustez do projeto do produto em contraste com as perturbações inerentes ao processo e o custo envolvido [51]. São sugeridos oito passos para o planejamento de um experimento de Taguchi: definir o problema; determinar o objetivo; determinar parâmetros e identificar ruídos, ambos com seus respectivos níveis; selecionar a matriz adequada e interações entre colunas; conduzir os experimentos e coletar dados; analisar os dados com metodologia adequada; interpretar os resultados e definir a condição ótima e realizar os experimentos de confirmação [26, 51].

A principal limitação do método de Taguchi é que este otimiza uma única característica por vez [52, 53]. Otimização de múltiplas características tornam o problema muito mais complexo. Alguns autores já sugeriram métodos complementares para a abordagem desse tipo de problema, dentre eles Grey apresenta-se como mais notável [26].

2.1.7.1. RAZÃO SINAL-RUÍDO

Em sua metodologia, Taguchi separa os fatores em dois grupos principais: Os fatores de controle e os fatores de ruído. Os fatores de controle são impostos pelo operador e os fatores de ruído são os que não podem ser controlados diretamente, sendo na maioria das vezes indesejável. Na estatística tradicional, estes são por vezes referidos como fatores fixos e aleatórios [54].

A engenharia da qualidade e o princípio de projeto robusto segundo Taguchi, buscam a redução da variância dos produtos e processos e, por consequência, a diminuição da sensibilidade ao ruído a uma tolerância aceitável, diminuindo a ocorrência de defeitos que causam o retrabalho ou o descarte da peça sendo fabricada [54]. A forma mais usual de quantificar essa sensibilidade é a razão sinal-ruído, que é uma função logarítmica medida em decibel (dB), em que quanto maior o valor encontrado, menos suscetível aos efeitos de fatores indesejáveis e não controláveis está o produto ou processo com relação aos fatores controlados [45].

Dependendo do tipo de característica avaliada, as razões sinal-ruído podem ser de três tipos diferentes: quanto maior melhor; nominal é melhor; e, quanto menor melhor [54,55], como pode ser visto na tabela 3.

Tabela 3: Fórmulas da razão sinal-ruído [55]

Razão sinal-ruído	Objetivo do experimento	Característica dos dados	Fórmulas de razão sinal-ruído
Quanto maior melhor	Maximizar a resposta	Positivos	$S/N_L = -10 * \log\left(\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n \frac{1}{y_i^2}\right)$
Nominal é melhor	Criar uma resposta alvo e basear a razão sinal-ruído somente em desvios padrão	Positivos, zero ou negativos	$S/N_t = -10 * \log(s_y^2)$
Nominal é melhor (Padrão)	Criar uma resposta alvo e basear a razão sinal-ruído em médias e desvios padrão	Não negativos com um “zero absoluto” no qual o desvio padrão é zero quando a média é zero	$S/N_t = 10 * \log(s_y^2)$ Formula ajustada é: $S/N_t = 10 * \log\left(\frac{\bar{y}^2}{s_y^2}\right)$
Quanto menor melhor	Minimizar a resposta	Não negativos com valor alvo zero	$S/N_S = -10 * \log\left(\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n y_i^2\right)$

Onde:

\bar{y} – Média dos dados observados;

s_y^2 – Variância de y ;

n – Número de observações;

y – Dados observados.

A razão sinal-ruído Nominal-é-Melhor (padrão) é útil para se analisar ou identificar fatores de escala, que são fatores nos quais a média e o desvio padrão variam proporcionalmente. Fatores de escala podem ser usados para ajustar a média ou o alvo sem afetar as razões sinal-ruído [55].

Para ter um valor de referência relativamente à verificação dos resultados, após realizar as medições dos experimentos ótimos é necessário estimar, teoricamente, a razão sinal-ruído em condições otimizadas. A equação abaixo, é a maneira convencional de se obter esse valor [9, 26, 44, 49].

$$\hat{\eta} = \eta_m + \sum_{i=1}^q (\bar{\eta}_i - \eta_m)$$

Onde:

$\hat{\eta}$ – Razão sinal-ruído ótima estimada;

η_m – Média total da razão sinal-ruído;

$\bar{\eta}_i$ – Razão sinal-ruído média para o nível ótimo;

q – Número de parâmetros avaliados.

Independente da categoria da característica de desempenho, o maior valor da razão sinal-ruído corresponde a melhor resposta [53].

2.1.7.2. ANÁLISE DE VARIÂNCIA

A análise de variância, usualmente chamada de ANOVA, foi desenvolvida por Ronald Aylmer Fisher, e é uma ferramenta estatística usada para testar a importância de fatores em seus níveis para uma determinada resposta [56], sendo também eficiente quando se tem uma amostra reduzida e/ou limitada. Na forma geral, uma tabela ANOVA de regressão múltipla, apresenta a fonte ou parâmetro em questão, os graus de liberdade (GDL); a soma dos quadrados (SQ), que apresentam uma medida de desvio da média e inclui o cálculo do erro na soma total; os quadrados médios (QM), que são a razão da soma dos quadrados pelos graus de liberdade; a estatística F, que representa uma proporção de médias quadradas em relação a média quadrada do erro; e a estatística P, que está relacionada com a evidência contra a hipótese nula [57]. Ross [54] usa ainda a contribuição em porcentagem fazendo uma conversão simples da soma dos quadrados.

CAPÍTULO 3

3.1. PROCEDIMENTO EXPERIMENTAL

Os experimentos foram realizados no segundo semestre do ano letivo 2016-2017, utilizando as dependências e equipamentos do Laboratório de Eletrotécnica (LE), Laboratório de Tecnologia Mecânica, e Laboratório de Tecnologia Térmica (LTT), localizados no prédio da Escola Superior de Tecnologia e Gestão (ESTiG) do Instituto Politécnico de Bragança, campus Santa Apolónia. O desenvolvimento das atividades foi orientado pelos professores doutores João Eduardo Pinto Castro Ribeiro e José Alexandre de Carvalho Gonçalves, e contou com auxílio dos bolsеiros do projeto “Automatização de Processos de Soldadura de Estruturas Hiperestáticas em Liga de Alumínio”, mestres em engenharia industrial Arlindo Pascoal e Eduardo Izeda.

3.1.1. MATERIAIS

- Robô YASKAWA MOTOMAN MA2010 tipo YR-MA02010-A01, adquirido em junho de 2016, capacidade de carga útil de 10 Kg, massa de 280 Kg, com 6 graus de liberdade, número de série R16479-749-4, número de pedido S62N96-1-6, máxima pressão pneumática de 490 kPa, tensão de alimentação AC 400V trifásico, 50/60 Hz, e potência consumida de 2,0 kVA;

- Controlador YASKAWA DX200, adquirido em setembro de 2016, fonte de alimentação trifásica: 400/415/440 V, 50/60 Hz, potência consumida 2,0 kVA, corrente de carga total de 5,8 A, corrente de curto circuito 2,5 kA, desenho número 349854210, número de série 162017, tipo ERES-MA02010-E00, tipo do robô YR-MA02010-A00;

- Mesa móvel MOTOMAN MT1-250 S2CX, número da máquina 315128, fabricada em 2003-01, com 2 graus de liberdade e 250 Kg;

- Fonte de Solda MIG/MAG FRONIUS TransPuls Synergic 4000 CMT R, número de série 28078438, em conjunto com um robô de avanço de arame VR 1550 4R/F++ Roboter, número de série 28096066, uma unidade de refrigeração FK4000 R FC, com bomba centrífuga e sensor de fluxo com filtro de refrigerador, número de série 28096065, e uma tocha de soldadura Robacta Drive CMT-PAP W, número de série 28096067 com bocal 34,0305,1974,630 Robacta 5000 36° OVT L=224 mm e H=86mm.

- Suporte para fixação das peças na mesa;

- Chapa de cobre de 2 mm de espessura;
- Liga de alumínio 6082-T6 em barras de seção retangular 40x5mm;
- Liga de alumínio 5754 em fio de 1mm de diâmetro AlcoTec Wire Corporation;
- Argônio comprimido PRAXAIR;
- Exaustor para fumos PEGAS P-001 MF- FILTER, número de série 201604429-2016 alimentação AC 230 V, 5,15 A, 50Hz, 0,75 Kw;
- Guilhotina hidráulica MINI 320, número 021854, 1988, pressão máxima de 250 bar;
- Máscara de solda automática ANSI/ISEA Z87.1-2010;
- Luvas de poliéster preto para riscos mecânicos 688-NYN/N;
- Paquímetro;
- Régua;
- Máquina de corte de mesa Struers Labotom;
- Disco de corte AKASEL Aka-Cut 500 HV 254x1,7x32 mm;
- Embutidora Struers LaboPress-1;
- Pó antiaderente;
- Resina fenólica (baquelite);
- Máquina de polir Struers LaboPol-25, tipo 05866327, número de série 5860001;
- Discos de papel abrasivo BUEHLER CarbiMet™ Grit 220 [P240], Grit 280 [P320], Grit 360 [P600], Grit 500 [P1000] e Grit 1000 [P2500];
- Suspensão de polimento de Sílica Coloidal BUEHLER MasterMet™ 40-6370-064, pH 9,8, 0,06 µm;
- Solução de Osmond, composição: 10ml de ácido clorídrico concentrado (HCl), 10ml de ácido nítrico concentrado (HNO₃), 10 ml de ácido fluorídrico (HF), 25ml de água destilada;
- Microscópio Veho VMS-005-LCD, ampliação digital de 1200x e ampliação ótica de 300x e *software* Veho PortableCapture Pro version 3.0.0;
- Escova de aço.

3.1.2. MÉTODOS

Esta seção apresenta ordenadamente todas as etapas realizadas desde o planejamento e realização dos experimentos até a obtenção dos resultados.

3.1.2.1. SELEÇÃO DE MATERIAIS

As liga de alumínio 6082-T6 e 5754, metal base e metal de adição respectivamente, foram selecionados para a realização dos experimentos de acordo com o interesse da empresa financiadora do projeto [2], devido a suas propriedades que tornam factível sua utilização em elementos estruturais hiperestáticos soldados.

A liga 6082 apresenta média para alta resistência, é empregada em aplicações estruturais e oferece propriedades mecânicas similares às ligas 6061 e boas características de acabamento e soldabilidade [58]. O material utilizado nesse projeto passou por um tratamento T6, que significa que passou por solubilização e envelhecido artificial. O metal de adição foi escolhido em conformidade com o metal base.

3.1.2.2. PLANEJAMENTO DO EXPERIMENTO

O método escolhido para planejar os experimentos foi o método das matrizes ortogonais de Taguchi. Esta abordagem permite reduzir significativamente o número de experimentos a serem realizados, os recursos necessários para tal e o tempo demandado para obter resultados, sem comprometer a confiabilidade e robustez destes. Por esse motivo, é amplamente utilizado pela indústria para a condução de experimentos de otimização.

O objetivo foi avaliar e otimizar a penetração, largura de cordão e reforço de soldadura MIG robotizada em uma chapa de liga de alumínio 6082-T6, 40x5 mm com metal de adição Al 5754 em arame de Ø1 mm. Para fins de comparação, dois tipos de deposição foram analisados, sendo eles: MIG convencional (*Standard*) e MIG CMT (*Cold Metal Transfer*) pulsado. Embora a intenção seja usar os parâmetros ótimos para soldadura de topo e/ou geometrias e trajetórias mais complexas, nesta fase inicial, os testes foram feitos como soldadura de revestimento, ou seja, sem colar placas, porém buscando uma geometria de cordão ideal para realizar juntas soldadas placa-placa, placa-tubo e tubo-tubo. A concepção de geometria desejada teria uma penetração e uma largura de cordão iguais a 5 mm, mesma espessura da chapa, e um reforço tendendo a 0 mm.

Conforme a tabela 4, para os testes MIG *Standard* foram mantidos constantes os parâmetros de trabalho com uma corrente de 165 A, uma tensão de 20,8 V e uma velocidade de fio na soldadura, aqui referido como alimentador, de 13,4 m/min e, para os testes MIG CMT Pulsado, corrente de 98 A, tensão de 16,4 V e alimentador a 8,3 m/min; para ambos os casos, a velocidade de avanço foi 15 mm/s. Recomenda-se que o

comprimento do arco, ou seja, a distância do eletrodo à placa, esteja no intervalo entre 8 e 12 mm. Buscou-se manter essa distância o mais próximo possível do valor máximo, porém é um parâmetro difícil de controlar devido as imperfeições geométricas de planicidade da chapa, as deformações impostas devido a dilatação por adição de calor no processo de soldadura e a própria precisão do movimento do braço robótico.

Os processos MIG/MAG utilizam geralmente fonte de corrente contínua e polaridade inversa com eletrodo positivo a fim de possibilitar melhor penetração e estabilidade do arco. Quando não é necessária grande penetração, é possível usar a polaridade direta, o que aumenta a velocidade de deposição. A corrente alternada é usualmente utilizada para alumínio e suas ligas, embora para os experimentos foi utilizada corrente contínua.

Tabela 4: Parâmetros de trabalho

Parâmetro	Standard	CMT Pulsado
Corrente	165 A	98 A
Tensão	20,8 V	16,4 V
Alimentador	13,4 m/min	8,3 m/min
Velocidade de avanço	15 mm/s	15 mm/s
Comprimento de arco	12 mm	12 mm

Foram selecionados 12 parâmetros dentre os ajustes de processamento, que estão dispostos na tabela 5, com três níveis cada um, e foram desprezadas as interações entre parâmetros. Os parâmetros a serem avaliados e os intervalos para os valores utilizados nos níveis de cada parâmetro foram escolhidos com base nas recomendações dos fabricantes dos equipamentos e em testes realizados anteriormente. Constatou-se na fase experimental que para pré-fluxo de gás superior a 0,7 s não havia o escorvamento ou ignição do arco, o que fez o nível 3 do parâmetro A ser alterado de 0,9 s para 0,7 s.

Tabela 5: Parâmetros e níveis para os experimentos de Taguchi

Letra	Parâmetro	Intervalo	N1	N2	N3
A	Pré-fluxo de gás	0 – 9,9 s	0,1	0,5	0,7
B	Pós-fluxo de gás	0 – 9,9 s	0,5	1,5	3
C	Velocidade de alimentação	1 – 22 m/min	10	8	12
D	Correção anti-adesão	-0,2 – 0,2 s	-0,2	0	0,2
E	Valor nominal do gás	Desl – 5 – 30 l/min	15	5	25
F	Fator Gás	Automático – 1 – 10	Auto	5	10
G	Corrente inicial	0 – 200 %	120	90	140
H	<i>Slope 1</i>	0,1 – 9,9 s	0,3	0,1	1

I	Corrente final	0 – 200 %	70	50	100
J	Tempo inicial	Desl – 0 – 9,9 s	0,7	0,5	1,5
K	Tempo final	0,1 – 9,9 s	0,2	0,5	1
L	<i>Slope 2</i>	0,1 – 9,9 s	0,1	0,5	1

Para calcular os graus de liberdade, somaram-se os graus de liberdade da média geral, que sempre tem valor um atribuído, os graus de liberdade de cada fator, que são obtidos através do número de níveis menos um, e como foram desprezadas as interações entre fatores, esta teve valor zero. Sendo assim, chegou-se a um valor de 25 DOF (*degrees of freedom*). A matriz selecionada de acordo com a metodologia de Taguchi deve ter um número de experimentos maior que o número de graus de liberdade, portanto, a matriz ortogonal L27, apresentada na tabela 6, se mostra a opção mais viável.

Tabela 6: Matriz L₂₇ (3¹³) de Taguchi

Nº	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13
1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1
2	1	1	1	1	2	2	2	2	2	2	2	2	2
3	1	1	1	1	3	3	3	3	3	3	3	3	3
4	1	2	2	2	1	1	1	2	2	2	3	3	3
5	1	2	2	2	2	2	2	3	3	3	1	1	1
6	1	2	2	2	3	3	3	1	1	1	2	2	2
7	1	3	3	3	1	1	1	3	3	3	2	2	2
8	1	3	3	3	2	2	2	1	1	1	3	3	3
9	1	3	3	3	3	3	3	2	2	2	1	1	1
10	2	1	2	3	1	2	3	1	2	3	1	2	3
11	2	1	2	3	2	3	1	2	3	1	2	3	1
12	2	1	2	3	3	1	2	3	1	2	3	1	2
13	2	2	3	1	1	2	3	2	3	1	3	1	2
14	2	2	3	1	2	3	1	3	1	2	1	2	3
15	2	2	3	1	3	1	2	1	2	3	2	3	1
16	2	3	1	2	1	2	3	3	1	2	2	3	1
17	2	3	1	2	2	3	1	1	2	3	3	1	2
18	2	3	1	2	3	1	2	2	3	1	1	2	3
19	3	1	3	2	1	3	2	1	2	3	1	3	2
20	3	1	3	2	2	1	3	2	1	3	2	1	3
21	3	1	3	2	3	2	1	3	2	1	3	2	1
22	3	2	1	3	1	3	2	2	1	3	3	2	1
23	3	2	1	3	2	1	3	3	2	1	1	3	2
24	3	2	1	3	3	2	1	1	3	2	2	1	3

25	3	3	2	1	1	3	2	3	2	1	2	1	3
26	3	3	2	1	2	1	3	1	3	2	3	2	1
27	3	3	2	1	3	2	1	2	1	3	1	3	2
	a	b	a	a	c	a	a	b	a	a	b	a	a
			b	b ²		c	c ²	c	b	b ²	c ²	b ²	b
								c	c ²		c	c ²	
GRUPO	1	2						3					

Para ajustar a matriz aos 12 e não 13 parâmetros avaliados, a coluna três foi escolhida aleatoriamente para ser excluída. O fato de não considerar as interferências entre parâmetros permite que a escolha seja feita dessa forma. Foram realizados três testes para cada uma das combinações de parâmetros, de modo a possibilitar um tratamento estatisticamente mais apurado dos dados obtidos. Sendo assim, foram realizados 162 cordões de solda, ou seja, três repetições de cada um dos 27 experimentos para MIG CMT Pulsado e três repetições de cada um dos 27 experimentos para MIG *Standard*, diminuindo o erro e garantindo repetibilidade.

3.1.2.3. PREPARAÇÃO EXPERIMENTAL

Nesta etapa, foi feita a montagem do sistema e ajuste dos equipamentos de modo a decorrer os experimentos de forma segura e sem interrupções, evitando a colisão das máquinas entre si e o funcionamento estável do conjunto. Primeiramente o material base Al 6082-T6, fornecido em forma de barras de seção retangular, com 40 mm de largura e 5mm de espessura, foi cortado na guilhotina para os provetes ficarem com comprimento de 320,0 mm. O suporte de fixação permite a montagem de três chapas como mostrado na figura 4, separadas umas das outras por uma distância de aproximadamente 25 mm. Uma chapa de cobre de 2 mm de espessura foi posicionada entre as chapas e a mesa com a função de proteger a mesa de respingos, material fundido, e também ajudar a dissipar o calor proveniente do processo de soldadura. Os cordões têm comprimento de aproximadamente 75 mm, longitudinalmente separados por 15 mm e transversalmente separados por 10 mm, de modo que um cordão não interfira nos adjacentes, como se pode ver na figura 5.



Figura 4: Fixação dos provetes



Figura 5: Disposição dos cordões na placa

Quanto ao que se refere a posição de soldadura, optou-se por manter a mesa estática, com a superfície no plano horizontal. A tocha foi posicionada com o arame perpendicular às placas a serem soldadas e o exaustor logo acima, de modo a captar os gases e fumos sem colidir com o robô durante a realização da trajetória, como representado na figura 6.



Figura 6: Posicionamento do sistema para soldadura

3.1.2.4. PROGRAMAÇÃO DO ROBÔ E FONTE DE SOLDA

Na programação da trajetória do robô, basicamente escolhe-se entre quatro tipos de coordenadas cartesianas para dados de posição XYZ: as coordenadas do robô, que são indicadas em cada elo para cada um dos 6 graus de liberdade onde a origem é o centro da base do robô; as coordenadas de base, que apenas se diferem das do robô quando este é montado sobre trilhos; as coordenadas de ferramenta, que têm como origem a ponta da ferramenta; e as coordenadas de usuário, que são programadas pelo usuário.

Para esse caso, foram selecionadas as coordenadas cartesianas de base, em que se deve demarcar pontos a serem percorridos sequencialmente no espaço e o tipo de movimento a ser realizado entre dois pontos. Dentre eles destacam-se os comandos MOVL, que demanda uma trajetória linear entre dois pontos, o MOV C, que delimita um movimento circular entre dois pontos e o MOV J, que executa o movimento das juntas para o menor esforço mecânico e elétrico do robô ao deslocar-se de um ponto ao outro em velocidade rápida.

Deve-se também descrever as velocidades desejadas para cada movimento, como o avanço rápido para posicionamento, velocidade de aproximação e velocidade de avanço durante a soldadura. Outras variáveis a serem inseridas são o tempo de permanência em determinado ponto e o afastamento que o robô deve desempenhar. Nesse programa principal, também precisa estar indicado o momento em que o arco elétrico deve ser aberto e encerrado. O código detalhado do robô pode ser consultado no anexo I.

No *software* da máquina de soldar, *Fronius Xplorer* foram inseridos os valores para os 12 parâmetros dentre os ajustes de processamento escolhidos como descritos na matriz de Taguchi. Os demais foram mantidos com os valores padrão (*default*) inseridos pelo próprio *software*. Nesta etapa também é definido o método de deposição. Esses programas são acionados pelo programa principal do robô.

Devido ao fato de serem montadas três chapas por vez, e em cada chapa serem efetuados 6 cordões de soldadura, foram necessários cinco programas com trajetórias idênticas, porém com variação dos parâmetros de solda usados para cada um dos dois métodos de deposição avaliados.

Para entender melhor a sequência e a trajetória da soldadura pode-se observar na figura 7 os cordões enumerados de 1 a 18, na ordem em que foram decorridos. Sendo que os cordões um, dois e três possuem os mesmos parâmetros, os cordões quatro, cinco e seis também possuem os mesmos parâmetros e assim sucessivamente.



Figura 7: Sequência de soldadura

Observando-se a figura 8 e sabendo que o robô parte da posição de segurança, situada na zona livre e se aproxima em velocidade rápida até entrar na zona de trabalho, onde a ponta da tocha fica a uma distância de aproximadamente 20 mm da superfície da chapa no ponto um. O robô se move em velocidade baixa até a iminência de tocar a superfície, de modo que a primeira combinação de parâmetros é acionada e o arco elétrico é aberto, iniciando-se o processo de soldadura. A tocha se desloca até o ponto dois em velocidade de avanço programada e então o arco elétrico é encerrado, aguarda o tempo de espera programado nesse ponto em que a tocha se mantém na posição e depois afasta-

se 20 mm em movimento linear, para se posicionar no ponto três com movimento rápido, aproxima-se da chapa, abre o arco e a solda é executada até o ponto quatro, onde ocorre o fechamento do arco e corte do arame.

Posteriormente, respeitando o tempo de espera, afasta-se novamente em MOVL, posiciona-se no ponto cinco em MOVJ, aproxima-se, e abre o arco para realizar o último cordão utilizando a primeira combinação de parâmetros, move-se em velocidade de soldadura até o ponto seis, fecha o arco, corta o arame e permanece o tempo de espera, afasta-se 20 mm em movimento linear, com velocidade de segurança, e posiciona-se no topo do cordão quatro.

Foi estabelecida uma espera de cinco minutos para o início de cada sequência de soldas, proporcionando tempo para arrefecer o material. Tal procedimento é essencial para a qualidade dos resultados e para que todas as soldas sejam feitas sob as mesmas condições, devido à influência da temperatura no processo de soldadura. Na sequência, foram feitos da mesma forma os cordões quatro, cinco e seis com a segunda combinação de parâmetros e assim sucessivamente, até as seis condições experimentais programadas serem efetivadas.

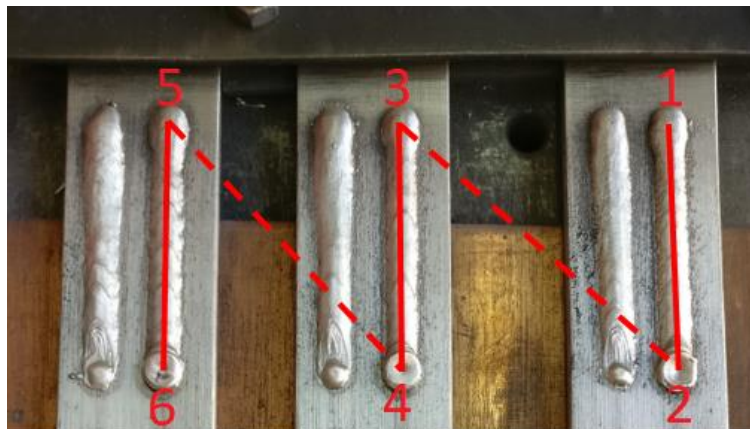


Figura 8: Trajetória do robô no plano

Durante o período de espera, o arame na ponta da tocha era cortado para remover o aspecto de gota formado devido à fusão e deposição do material, como pode ser visto na figura 9, problema posteriormente resolvido pela função *burnback*. Foi realizada também, a limpeza da superfície com escova de aço e pano macio para a próxima bateria de soldaduras, figura 10.



Figura 9: Formato de gota na ponta do arame



Figura 10: Cordão de solda antes e depois de escovado

Após efetivadas todas as seis soldaduras em cada uma das três placas, estas eram retiradas e novas placas montadas na mesa, repetindo-se o processo até todas as soldaduras serem realizadas.

3.1.2.5. PREPARAÇÃO DAS AMOSTRAS

Para efetuar o controle dimensional da largura, reforço e penetração do cordão foi necessário preparar as amostras para o teste macrográfico. Para isso, foi necessário cortar as placas soldadas na região central dos cordões de solda. Na operação de usinagem foi utilizada a serra de mesa com disco rotativo de corte abrasivo mostrada na figura 11.



Figura 11: Serra de mesa Struers Labotom

As amostras foram retiradas da região central do cordão, com um comprimento de aproximadamente 20 mm, de modo a evidenciar a superfície transversal do cordão. Foram feitos cortes longitudinais para separar as soldas que estavam lado a lado numa mesma placa, conforme a figura 12.



Figura 12: Amostras cortadas

As três amostras com parâmetros iguais foram agrupadas e embutidas a quente em um mesmo baquelite a uma temperatura de 180°C e uma pressão de 30 kN, utilizando a embutidora mostrada na figura 13.



Figura 13: Embutidora Struers LaboPress-1

Depois de arrefecidas, as amostras foram levadas à máquina de polir, mostrada na figura 14, onde passaram gradualmente por cinco lixas, da mais grossa a mais fina, com grãos abrasivos das classificações 240, 320, 600, 1000 e 1200. Finalmente, através da suspensão de Sílica Coloidal com partículas de 0,06 μm atingiu-se o nível de polimento desejado. Após as superfícies estarem suficientemente polidas, os corpos de prova foram

lavados com água e imersos em solução química de Osmond, durante aproximadamente um minuto, para evidenciar a região soldada da região de material base.



Figura 14: Máquina de polir Struers LaboPol-25

O aspecto das amostras resultantes de todos os processos pode ser observado na figura 15.



Figura 15: Aspecto das amostras

3.1.2.6. MEDIÇÃO DAS AMOSTRAS

Depois das amostras prontas, foi feita a calibração do microscópio Veho VMS-005-LCD, figura 16, através do *software* fornecido pelo fabricante.



Figura 16: Microscópio Veho VMS-005-LCD

O primeiro passo foi posicionar um dos corpos de prova no suporte do microscópio e ajustar o foco até que a imagem ficasse nítida. Para a realização da calibração, o *software* pede que o usuário do equipamento entre com valores reais de comprimento; foi então utilizada uma escala graduada, para indicar os valores de dois, quatro, seis e oito milímetros respectivamente. A escala obtida implicou em um aumento de 17,7 vezes para as amostras em geral, porém, constatou-se que para a medição de larguras de cordão de algumas amostras este valor de ampliação não foi satisfatório, o que forçou uma calibração diferente apenas para esses provetes. As exceções foram os experimentos MIG *Standard* com a combinação de parâmetros número um, que solicitou um aumento de 18,18 vezes e as amostras MIG *Standard* números 8 e 14, com aumento de 15,98 vezes.

Com o auxílio do microscópio e respectivo *software*, foram tiradas fotografias e medições das amostras, como o exemplo mostrado na figura 17, para largura do cordão (L), penetração (P) e reforço (R). Os dados foram anotados em planilhas do *Microsoft Office 365 Excel 2016*. As imagens podem ser consultadas no anexo II e as planilhas mais adiante nos resultados.

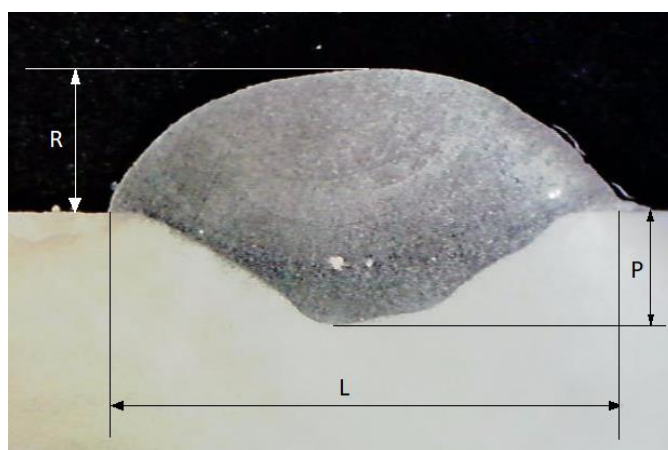


Figura 17: Esquemático das medições das amostras

3.1.2.7. TRATAMENTO DOS DADOS

Com o intuito de aumentar o rigor científico e a significância estatística, diminuindo as chances de erro, cada teste foi repetido três vezes. Como é habitual para experimentos de Taguchi, com auxílio de *software Microsoft Office 365 Excel 2016*, calculou-se a razão sinal-ruído para o conjunto de cada três experimentos de cada uma das 27 combinações de parâmetros de acordo com a fórmula mais indicada.

Para o reforço, foi utilizada a fórmula quanto menor melhor, onde a intenção era minimizar a resposta, ou seja, que fosse o mais próximo possível de zero, o que significa

que este estaria no mesmo nível da chapa soldada, trazendo vantagens construtivas e estéticas. Para as outras duas medições, da largura de cordão e da penetração, era desejável que fossem iguais ou próximas a espessura da placa, que tinha cinco milímetros, o que sugere uma resposta alvo e conseqüentemente a fórmula nominal é melhor.

Foi atribuído a cada parâmetro uma letra de A a L, sequencialmente, e aos níveis os respectivos números um, dois e três como indicado na tabela 5. Após calculada a razão sinal-ruído, para cada uma das 27 combinações de parâmetros para MIG *Standard* e MIG CMT Pulsado, tirou-se a média simples dos valores sinal-ruído de cada nível em seu respectivo parâmetro.

Posteriormente foi plotado o gráfico de valor médio sinal-ruído dos parâmetros em cada nível, onde um valor maior de sinal-ruído indica o nível com melhor desempenho para cada parâmetro. A combinação dos 12 valores mais altos em cada parâmetro indica a combinação ótima para atingir a característica em foco.

Aplicou-se a metodologia de análise de variância no modelo linear geral para verificar os parâmetros de maior influência nos resultados para as características desejadas. Fez-se uso do *software Minitab 17.3.1* em sua versão gratuita de testes. Notou-se, neste ponto dos experimentos, que quatro parâmetros não influenciariam na qualidade da solda no ponto onde estes estavam sendo analisados. Sendo assim, foram excluídos do cálculo da ANOVA o pós-fluxo de gás, o *slope 2*, o tempo final e a corrente final. Para os demais, os cálculos foram realizados normalmente.

A interpretação dos resultados depois de todos estes passos permitiu apontar a combinação ótima de parâmetros para um cordão de solda em relação a largura, penetração e reforço e, quais os parâmetros que exercem influência mais forte na resposta.

3.1.2.8. TESTES DE CONFIRMAÇÃO

Os parâmetros e respectivos níveis indicados como ótimos para cada uma das características desejadas, de acordo com os valores médios da razão sinal-ruído, foram inseridos no *software* da fonte de solda *Fronius Xplorer* e os experimentos de confirmação concretizados. Tal processo originou seis novos cordões, sendo estes para os parâmetros ótimos de largura de cordão, penetração e reforço para MIG *Standard* e os parâmetros ótimos de largura de cordão, penetração e reforço para MIG CMT Pulsado.

Foram preparadas amostras e feitas três medições utilizando-se da mesma metodologia das demais, porém com uma ampliação de 15,63 vezes no microscópio.

Estimou-se o valor teórico da razão sinal-ruído em condições ótimas. Finalmente foi calculada a razão sinal-ruído experimental para as novas amostras para comparação.

CAPÍTULO 4

4.1. RESULTADOS

Nesta seção, são apresentados os resultados obtidos através dos experimentos por medições e cálculos, em forma de tabelas e gráficos. Estes foram separados em três subseções de acordo com a característica avaliada pelo experimento: penetração, largura de cordão e reforço, respectivamente.

4.1.1. PENETRAÇÃO

Na tabela 7 são apresentados os resultados das três medições da penetração, aqui denominados M1, M2 e M3, a média entre as três medições e o valor da razão sinal-ruído para o método MIG *Standard* para cada um dos 27 experimentos. Os valores para o método MIG CMT Pulsado encontram-se em sequência na tabela 8.

Tabela 7: Medições, média e razão sinal-ruído para penetração - MIG *Standard*

Nº	M1 (mm)	M2 (mm)	M3 (mm)	Média (mm)	Sinal-ruído (dB)
1	1,718	1,790	1,761	1,756	30,580
2	1,629	2,161	2,285	2,025	10,917
3	2,200	2,252	2,154	2,202	27,952
4	2,043	2,071	2,158	2,091	26,202
5	2,299	2,527	2,299	2,375	19,373
6	2,373	2,112	2,266	2,250	19,402
7	2,192	2,406	2,065	2,221	17,033
8	2,614	2,435	2,294	2,448	17,658
9	2,051	2,071	1,931	2,018	24,177
10	2,473	2,339	1,977	2,263	13,576
11	1,957	2,078	2,313	2,116	16,607
12	2,516	2,480	2,494	2,497	36,585
13	1,609	1,575	1,877	1,687	17,389
14	2,602	2,384	2,745	2,577	16,569
15	2,118	2,433	2,219	2,257	17,633
16	2,636	2,630	2,140	2,469	12,675
17	2,276	2,154	2,453	2,294	18,219
18	2,113	2,038	1,984	2,045	25,532
19	1,841	1,739	2,005	1,862	19,206
20	1,970	1,875	2,086	1,977	21,282
21	1,942	1,786	2,060	1,929	18,999

22	2,129	1,897	1,916	1,981	19,562
23	1,805	1,804	1,890	1,833	27,892
24	1,949	2,154	1,818	1,974	17,185
25	1,811	2,002	2,087	1,967	18,755
26	2,173	2,325	2,318	2,272	23,090
27	2,041	1,982	1,989	2,004	31,595

Tabela 8: Medições, média e razão sinal-ruído para penetração - MIG CMT Pulsado

Nº	M1 (mm)	M2 (mm)	M3 (mm)	Média (mm)	Sinal-ruído (dB)
1	0,715	0,743	0,873	0,777	23,243
2	0,591	0,690	0,788	0,690	21,892
3	0,628	0,681	0,628	0,646	32,047
4	0,619	0,761	0,752	0,711	23,752
5	0,557	0,681	0,681	0,640	24,664
6	0,751	0,757	0,699	0,736	31,686
7	0,634	0,718	0,822	0,725	22,282
8	0,828	0,725	0,634	0,729	22,020
9	0,692	0,764	0,608	0,688	23,910
10	0,645	0,761	0,593	0,666	23,070
11	0,666	0,641	0,660	0,656	39,448
12	0,964	0,761	0,911	0,879	21,313
13	0,446	0,705	0,654	0,602	19,014
14	0,753	0,682	0,672	0,702	28,860
15	0,815	0,712	0,777	0,768	27,426
16	0,738	0,634	0,745	0,706	25,890
17	0,705	0,712	1,113	0,843	14,393
18	0,660	0,815	0,731	0,735	23,965
19	0,608	0,647	0,789	0,681	22,183
20	0,744	0,544	0,563	0,617	20,902
21	0,589	0,822	0,757	0,723	20,160
22	0,621	0,615	0,595	0,610	39,081
23	0,738	0,673	0,725	0,712	31,031
24	0,576	0,634	0,699	0,636	25,979
25	0,946	0,673	0,673	0,764	17,809
26	0,686	0,867	0,569	0,707	18,231
27	0,849	0,692	0,725	0,755	23,403

Foram plotados nas figuras 18 e 19, respectivamente, as médias das medições e as razões sinal-ruído MIG *Standard* e MIG CMT Pulsado para os 27 experimentos. Observa-

se na escala do eixo das ordenadas o uso do ponto como separador decimal em detrimento da vírgula, o que é justificado por uma limitação do *software* MATLAB R2016a desenvolvido pela *MathWorks* usado para as plotagens.

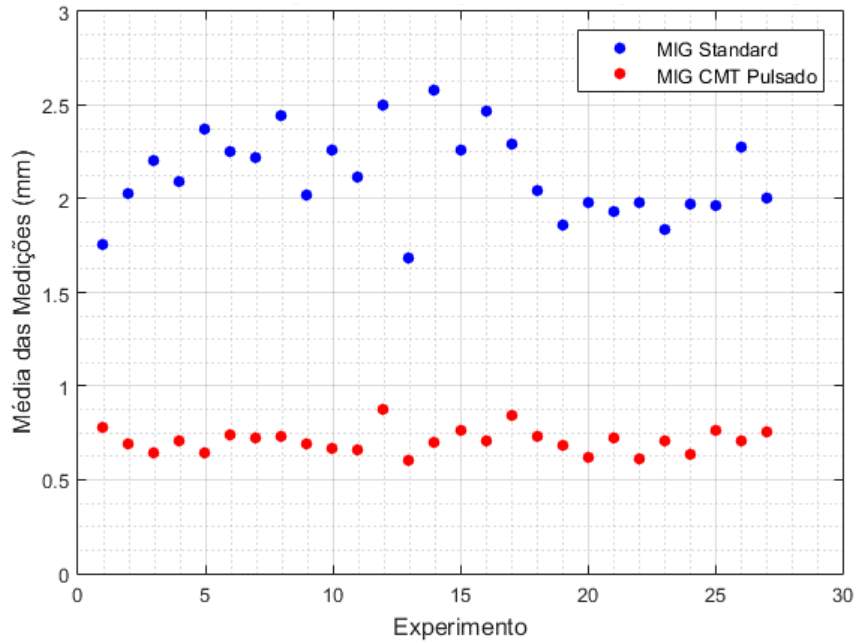


Figura 18: Média das medições dos experimentos para penetração

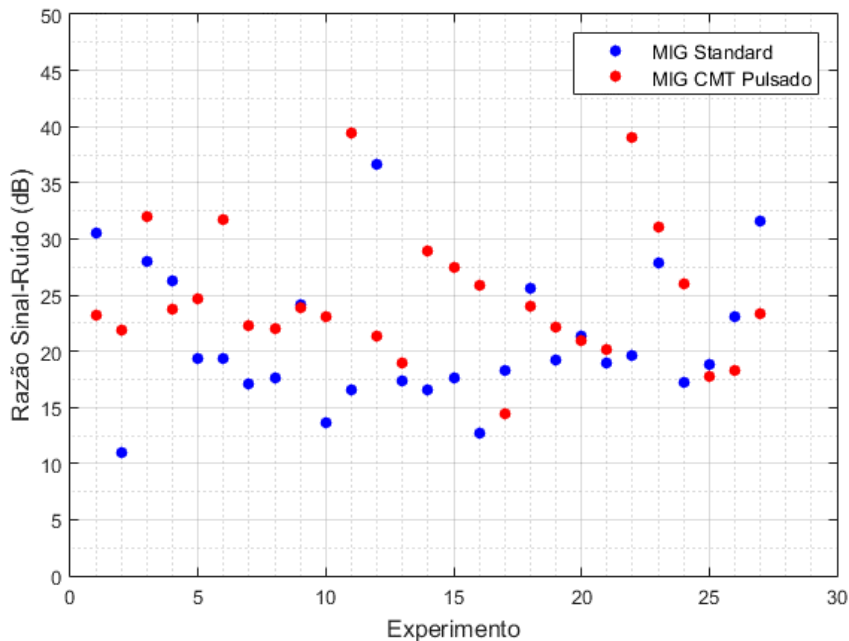


Figura 19: Razão sinal-ruído dos experimentos para penetração

Os valores da razão sinal-ruído médios para cada parâmetro e nível calculados estão descritos nas tabelas 9 e 10, e posteriormente plotados nas figuras 20 e 21 para MIG *Standard* e MIG CMT Pulsado, respectivamente.

Tabela 9: Razão sinal-ruído média para os níveis dos parâmetros MIG *Standard* para penetração

Parâmetro	Nível	Sinal-ruído médio
A	1	21,477
	2	19,420
	3	21,952
B	1	21,745
	2	20,134
	3	20,970
C	1	21,609
	2	20,099
	3	21,142
D	1	19,442
	2	19,068
	3	24,340
E	1	25,092
	2	17,707
	3	20,050
F	1	21,443
	2	20,580
	3	20,826
G	1	19,617
	2	21,473
	3	21,759
H	1	22,879
	2	19,597
	3	20,374
I	1	21,424
	2	20,734
	3	20,692
J	1	23,167
	2	16,823
	3	22,851
K	1	22,616
	2	18,298
	3	21,935
L	1	20,300
	2	22,026
	3	20,523

Tabela 10: Razão sinal-ruído média para os níveis dos parâmetros MIG CMT Pulsado para penetração

Parâmetro	Nível	Sinal-ruído médio
A	1	25,055
	2	24,820
	3	24,309
B	1	24,918
	2	27,944
	3	21,322
C	1	23,547
	2	23,066
	3	27,751
D	1	24,036
	2	24,604
	3	25,543
E	1	23,572
	2	22,899
	3	27,713
F	1	24,613
	2	24,484
	3	25,087
G	1	23,137
	2	26,152
	3	24,895
H	1	26,267
	2	22,605
	3	25,312
I	1	25,375
	2	23,557
	3	25,252
J	1	24,925
	2	25,924
	3	23,335
K	1	21,247
	2	25,470
	3	27,467
L	1	26,895
	2	23,022
	3	24,267

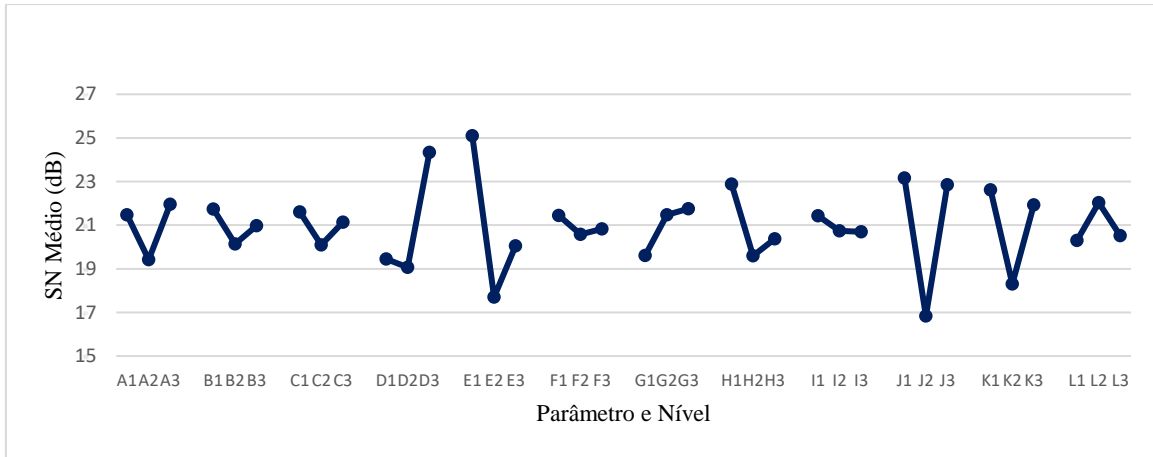


Figura 20: Curva SN média de cada nível para MIG *Standard* para penetração

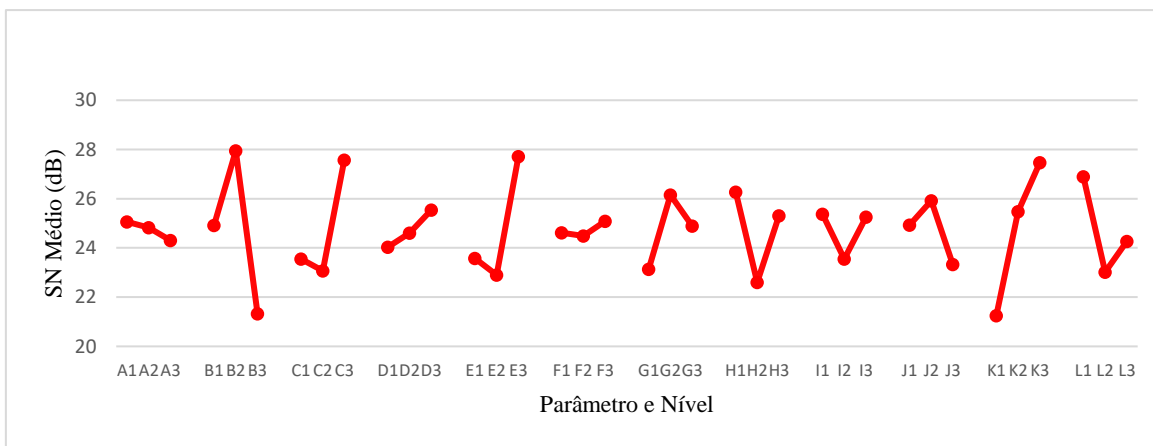


Figura 21: Curva SN média de cada nível para MIG CMT Pulsado para penetração

Os valores máximos da razão sinal-ruído de cada parâmetro, que indicam condições otimizadas, foram coletados e podem ser consultados na tabela 11 para MIG *Standard* e para MIG CMT Pulsado.

Tabela 11: Níveis ótimos para penetração em MIG *Standard* e MIG CMT Pulsado

Método	Níveis ótimos											
MIG <i>Standard</i>	A3	B1	C1	D3	E1	F1	G3	H1	I1	J1	K1	L2
MIG CMT Pulsado	A1	B2	C3	D3	E3	F3	G2	H1	I1	J2	K3	L1

As medições M1, M2 e M3 para os experimentos de confirmação realizados com a combinação de níveis ótimos para cada parâmetro, a média entre as três e a razão sinal-ruído podem ser vistas na tabela 12 para MIG *Standard* e na tabela 13 para MIG CMT Pulsado.

Tabela 12: Teste de confirmação MIG *Standard* para penetração

Teste	Resposta
M1 (mm)	1,945
M2 (mm)	1,913
M3 (mm)	1,963
Média (mm)	1,940
SN (dB)	33,690

Tabela 13: Teste de confirmação MIG CMT Pulsado para penetração

Teste	Resposta
M1 (mm)	0,747
M2 (mm)	0,762
M3 (mm)	0,779
Média (mm)	0,763
SN (dB)	37,673

A razão sinal-ruído estimada teoricamente através de equacionamento para os experimentos ótimos foi 39,601 dB para MIG *Standard* e 44,983 dB para MIG CMT Pulsado. Na tabela 14 são apresentados os resultados da análise de variância para MIG *Standard* e na tabela 15 os resultados para MIG CMT Pulsado.

Tabela 14: ANOVA para MIG *Standard* para penetração

Fonte	GDL	SQ	QM	Valor F	Valor P	Contribuição (%)
A	2	32,587	16,294	0,83	0,466	3,384
C	2	10,758	5,379	0,27	0,767	1,117
D	2	155,772	77,886	3,95	0,054	16,177
E	2	256,336	128,168	6,5	0,016	26,620
F	2	3,561	1,78	0,09	0,914	0,370
G	2	24,358	12,179	0,62	0,559	2,530
H	2	52,943	26,471	1,34	0,305	5,498
J	2	229,364	114,682	5,81	0,021	23,819
ERRO	10	197,258	19,726			20,485
TOTAL	26	962,938				

Tabela 15: ANOVA para MIG CMT Pulsado para penetração

Fonte	GDL	SQ	QM	Valor F	Valor P	Contribuição (%)
A	2	2,622	1,3108	0,03	0,975	0,290
C	2	110,126	55,0631	1,06	0,383	12,167
D	2	10,428	5,2138	0,1	0,906	1,152
E	2	122,329	61,1647	1,17	0,348	13,515
F	2	1,814	0,9072	0,02	0,983	0,200
G	2	41,285	20,6423	0,4	0,683	4,561
H	2	64,943	32,4714	0,62	0,556	7,175
J	2	30,696	15,3482	0,29	0,751	3,391
ERRO	10	520,903	52,0903			57,549
TOTAL	26	905,146				

4.1.2. LARGURA DE CORDÃO

Na tabela 16 são apresentados os resultados das três medições da largura de cordão, M1, M2 e M3, a média entre as três medições e o valor da razão sinal-ruído para o método MIG *Standard* para cada um dos 27 experimentos e os valores para o método MIG CMT Pulsado encontram-se na sequência, na tabela 17.

Tabela 16: Medições, média e razão sinal-ruído para largura de cordão - MIG *Standard*

Nº	M1 (mm)	M2 (mm)	M3 (mm)	Média (mm)	Sinal-ruído (dB)
1	8,093	8,350	8,637	8,360	13,065
2	8,545	8,506	8,851	8,634	16,235
3	8,323	8,943	8,290	8,519	10,447
4	8,447	9,137	8,915	8,833	10,824
5	8,372	8,708	9,023	8,701	11,508
6	8,714	8,667	8,915	8,765	19,367
7	8,513	9,123	8,922	8,853	11,910
8	10,053	9,281	8,791	9,375	5,689
9	8,077	9,049	8,580	8,569	8,026
10	8,781	8,600	8,426	8,602	16,776
11	8,124	8,640	8,654	8,473	12,160
12	8,951	9,197	8,423	8,857	9,819
13	7,052	7,193	8,446	7,564	4,061
14	9,231	8,833	9,965	9,343	6,579
15	8,755	8,848	8,506	8,703	16,810
16	9,390	8,942	8,371	8,901	7,597
17	9,044	8,853	8,908	8,935	21,908
18	8,684	8,065	8,935	8,561	8,740
19	7,977	8,351	8,514	8,281	12,964
20	9,118	8,785	8,588	8,830	13,202
21	8,178	8,361	8,730	8,423	12,781
22	8,492	8,460	8,376	8,443	26,211
23	8,350	8,343	8,100	8,264	18,693
24	9,213	8,837	8,264	8,771	8,174
25	7,915	8,587	8,587	8,363	9,985
26	8,541	8,982	8,798	8,774	14,853
27	8,501	8,416	8,910	8,609	13,325

Tabela 17: Medições, média e razão sinal-ruído para largura de cordão - MIG CMT Pulsado

Nº	M1 (mm)	M2 (mm)	M3 (mm)	Média (mm)	Sinal-ruído (dB)
1	6,102	6,262	6,139	6,168	23,300
2	5,609	5,987	6,201	5,932	12,225
3	6,139	6,156	6,422	6,239	17,749
4	6,439	6,041	5,785	6,088	11,402
5	5,953	5,855	5,838	5,882	25,903
6	6,160	6,581	6,050	6,264	12,809
7	6,011	6,251	6,186	6,149	19,883
8	6,749	6,270	6,743	6,587	12,979
9	6,057	5,895	6,555	6,169	11,031
10	6,439	6,572	6,121	6,377	14,461
11	5,934	5,636	5,397	5,656	13,165
12	6,348	6,218	6,466	6,344	19,889
13	5,798	6,024	6,070	5,964	18,498
14	6,024	6,437	6,366	6,276	14,880
15	5,882	6,038	6,037	5,986	22,697
16	5,947	6,238	5,940	6,042	17,149
17	5,966	6,497	5,947	6,137	11,872
18	5,941	5,934	6,050	5,975	25,496
19	6,542	5,927	5,986	6,152	11,149
20	5,960	6,083	6,563	6,202	11,695
21	5,908	6,238	6,277	6,141	15,623
22	6,659	5,940	6,665	6,421	9,361
23	6,173	5,856	6,257	6,095	15,255
24	6,264	6,523	6,879	6,555	11,968
25	6,309	6,225	6,089	6,208	20,853
26	6,206	6,393	6,173	6,257	20,276
27	6,232	6,646	5,850	6,243	9,761

São plotados nas imagens 22 e 23, respectivamente, as médias das medições e as razões sinal-ruído MIG *Standard* e MIG CMT Pulsado para os 27 experimentos.

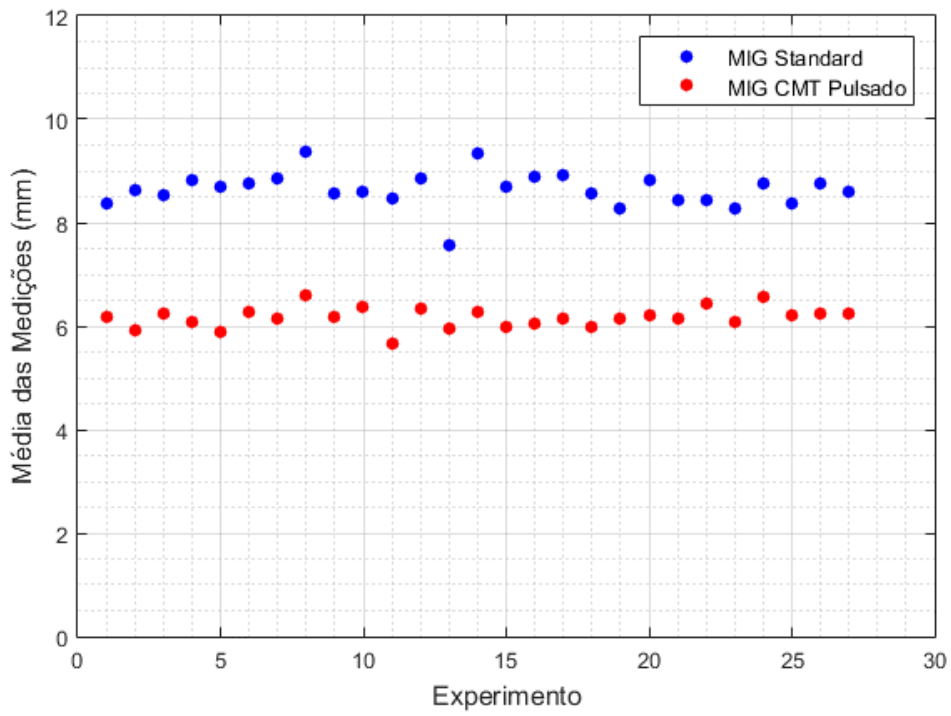


Figura 22: Média das medições dos experimentos para largura

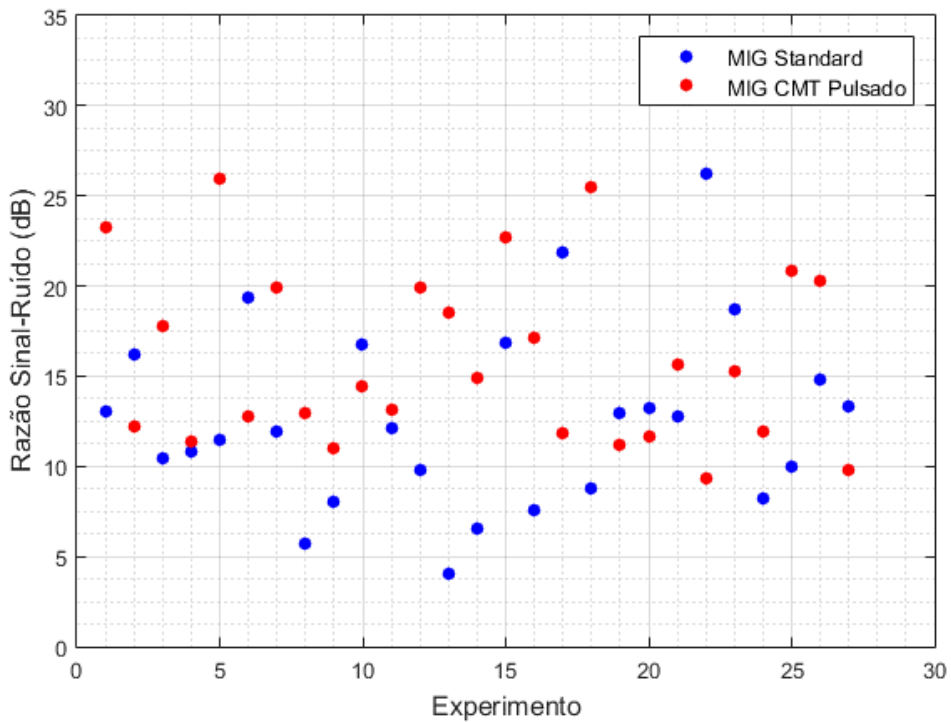


Figura 23: Razão sinal-ruído dos experimentos para largura

Os valores da razão sinal-ruído médios para cada parâmetro e nível calculados estão descritos nas tabelas 18 e 19, posteriormente plotados na figura 24 e 25 para MIG *Standard* e MIG CMT Pulsado, respectivamente.

Tabela 18: Razão sinal-ruído média para os níveis dos parâmetros MIG *Standard* para largura de cordão

Parâmetro	Nível	Sinal-ruído médio
A	1	11,897
	2	11,605
	3	14,465
B	1	13,050
	2	13,581
	3	11,337
C	1	11,707
	2	13,210
	3	13,051
D	1	12,599
	2	13,425
	3	11,943
E	1	13,102
	2	10,683
	3	14,183
F	1	12,303
	2	13,107
	3	14,401
G	1	12,531
	2	11,035
	3	12,761
H	1	14,671
	2	10,535
	3	11,616
I	1	10,563
	2	15,789
	3	12,186
J	1	12,827
	2	12,955
	3	11,083
K	1	14,828
	2	12,057
	3	13,668
L	1	14,253
	2	10,046
	3	20,523

Tabela 19: Razão sinal-ruído média para os níveis dos parâmetros MIG CMT Pulsado para largura de cordão

Parâmetro	Nível	Sinal-ruído médio
A	1	16,365
	2	17,568
	3	13,993
B	1	15,473
	2	15,864
	3	16,589
C	1	17,804
	2	15,900
	3	14,221
D	1	16,228
	2	15,361
	3	16,336
E	1	18,877
	2	15,396
	3	13,652
F	1	14,650
	2	17,839
	3	15,724
G	1	13,626
	2	18,576
	3	14,647
H	1	15,047
	2	18,232
	3	17,553
I	1	14,441
	2	15,931
	3	16,804
J	1	15,827
	2	15,294
	3	17,223
K	1	16,113
	2	14,590
	3	17,612
L	1	14,594
	2	15,720
	3	24,267

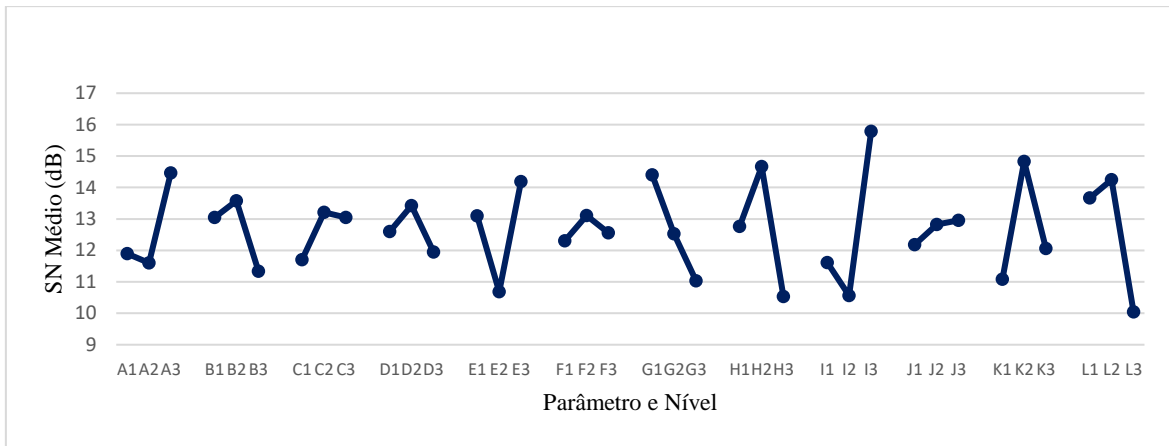


Figura 24: Curva SN média de cada nível para MIG Standard para largura

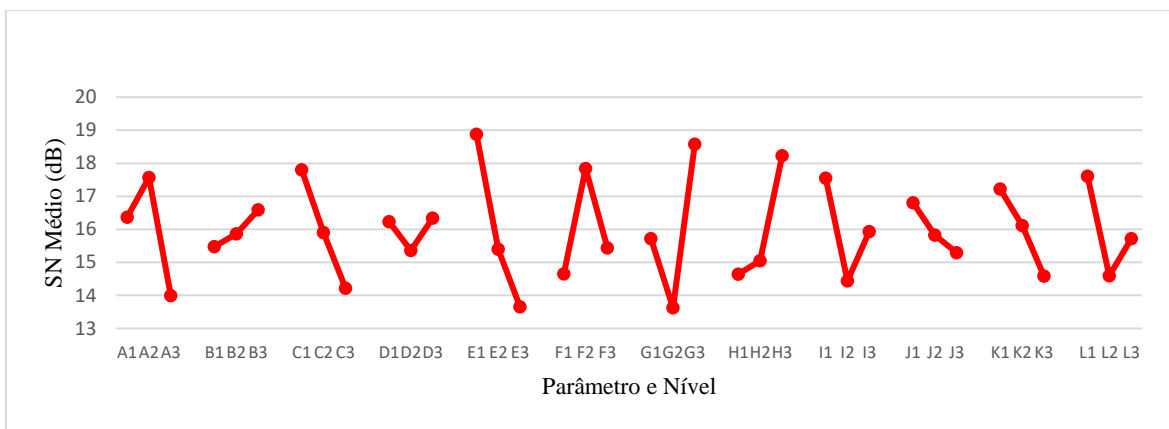


Figura 25: Curva SN média de cada nível para MIG CMT Pulsado para largura

Os valores máximos da razão sinal ruído de cada parâmetro, que indicam condições otimizadas, foram coletados e podem ser consultados na tabela 20 para MIG Standard e para MIG CMT Pulsado.

Tabela 20: Níveis ótimos para largura de cordão em MIG Standard e MIG CMT Pulsado

Método	Níveis Ótimos											
MIG Standard	A3	B2	C2	D2	E3	F2	G1	H2	I3	J3	K2	L2
MIG CMT Pulsado	A2	B3	C1	D3	E1	F2	G3	H3	I1	J1	K1	L1

As medições M1, M2 e M3 para os experimentos de confirmação realizados com a combinação de níveis ótimos para cada parâmetro, a média entre as três e a razão sinal-ruído podem ser vistas na tabela 21 para MIG Standard e na tabela 22 para MIG CMT Pulsado.

Tabela 21: Teste de confirmação MIG *Standard* para largura de cordão

Teste	Resposta
M1 (mm)	8,403
M2 (mm)	8,140
M3 (mm)	8,207
Média (mm)	8,250
SN (dB)	19,047

Tabela 22: Teste de confirmação MIG CMT Pulsado para largura de cordão

Teste	Resposta
M1 (mm)	6,555
M2 (mm)	6,196
M3 (mm)	6,297
Média (mm)	6,349
SN (dB)	16,411

A razão sinal-ruído estimada teoricamente através de equacionamento para os experimentos ótimos foi 29,652 dB para MIG *Standard* e 35,288 dB para MIG CMT Pulsado. Na tabela 22 são apresentados os resultados da análise de variância para MIG *Standard* e na tabela 23 os resultados para MIG CMT Pulsado.

Tabela 23: ANOVA para MIG *Standard* para largura de cordão

Fonte	GDL	SQ	QM	Valor F	Valor P	Contribuição (%)
A	2	44,584	22,292	0,54	0,598	6,644
C	2	12,279	6,14	0,15	0,869	1,830
D	2	9,925	4,962	0,12	0,888	1,479
E	2	57,811	28,906	0,7	0,519	8,615
F	2	3,035	1,518	0,04	0,964	0,452
G	2	51,172	25,586	0,62	0,557	7,626
H	2	77,172	38,56	0,94	0,424	11,500
J	2	3,051	1,525	0,04	0,964	0,455
ERRO	10	412,077	41,208			61,408
TOTAL	26	671,053				

Tabela 24: ANOVA para MIG CMT Pulsado para largura de cordão

Fonte	GDL	SQ	QM	Valor F	Valor P	Contribuição (%)
A	2	59,53	29,765	2,32	0,149	9,615
C	2	57,846	28,923	2,25	0,156	9,343
D	2	5,141	2,57	0,2	0,822	0,830
E	2	127,384	63,692	4,96	0,032	20,574
F	2	49,684	24,842	1,93	0,195	8,025
G	2	111,111	55,555	4,33	0,044	17,946
H	2	69,47	34,735	2,7	0,115	11,220
J	2	10,55	5,275	0,41	0,674	1,704
ERRO	10	128,426	12,843			20,743
TOTAL	26	619,141				

4.1.3. REFORÇO

Na tabela 25 são apresentados os resultados das três medições do reforço, M1, M2 e M3, a média entre as três medições e o valor da razão sinal-ruído para o método MIG *Standard* para cada um dos 27 experimentos e os valores para o método MIG CMT Pulsado encontram-se na sequência, na tabela 26.

Tabela 25: Medições, média e razão sinal-ruído para reforço - MIG *Standard*

Nº	M1 (mm)	M2 (mm)	M3 (mm)	Média (mm)	Sinal-ruído (dB)
1	1,815	1,907	1,795	1,839	-5,295
2	1,938	1,958	1,795	1,897	-5,568
3	1,782	1,436	1,795	1,671	-4,502
4	1,880	1,810	1,850	1,847	-5,329
5	1,817	1,629	1,750	1,732	-4,780
6	2,125	1,763	1,609	1,832	-5,320
7	1,823	1,951	1,951	1,908	-5,617
8	1,737	1,737	1,589	1,688	-4,553
9	2,004	1,843	1,951	1,933	-5,728
10	1,729	1,770	1,884	1,794	-5,084
11	2,038	1,877	1,810	1,908	-5,624
12	1,774	1,656	1,763	1,731	-4,770
13	1,971	1,971	1,964	1,969	-5,883
14	1,643	1,606	1,575	1,608	-4,127
15	1,703	1,837	1,884	1,808	-5,152
16	1,835	1,658	1,726	1,740	-4,817
17	1,712	1,943	1,896	1,850	-5,358
18	1,950	2,167	1,970	2,029	-6,156
19	2,025	1,964	1,957	1,982	-5,943
20	1,896	1,882	1,950	1,909	-5,619
21	1,931	1,914	1,947	1,931	-5,714
22	2,048	1,884	2,074	2,002	-6,037
23	1,962	1,903	2,087	1,984	-5,957
24	1,837	1,989	2,002	1,943	-5,774
25	2,114	1,976	1,883	1,991	-5,991
26	1,791	1,956	1,502	1,750	-4,909
27	1,837	1,890	1,824	1,850	-5,346

Tabela 26: Medições, média e razão sinal-ruído para reforço - MIG CMT Pulsado

Nº	M1 (mm)	M2 (mm)	M3 (mm)	Média (mm)	Sinal-ruído (dB)
1	1,413	1,468	1,362	1,414	-3,015
2	1,602	1,363	1,232	1,399	-2,968
3	1,398	1,433	1,238	1,356	-2,664
4	1,442	1,229	1,380	1,350	-2,628
5	1,451	1,468	1,434	1,451	-3,234
6	1,320	1,333	1,391	1,348	-2,596
7	1,346	1,327	1,288	1,320	-2,415
8	1,534	1,398	1,462	1,465	-3,321
9	1,340	1,352	1,288	1,327	-2,457
10	1,486	1,194	1,469	1,383	-2,857
11	1,327	1,314	1,262	1,301	-2,288
12	1,314	1,520	1,203	1,346	-2,620
13	1,398	1,365	1,307	1,357	-2,653
14	1,291	1,586	1,382	1,420	-3,076
15	1,333	1,411	1,294	1,346	-2,587
16	1,404	1,308	1,327	1,346	-2,587
17	1,359	1,294	1,346	1,333	-2,499
18	1,404	1,372	1,340	1,372	-2,749
19	1,657	1,262	1,339	1,419	-3,104
20	1,210	1,437	1,456	1,368	-2,749
21	1,430	1,417	1,333	1,393	-2,885
22	1,443	1,430	1,378	1,417	-3,029
23	1,346	1,566	1,404	1,439	-3,177
24	1,553	1,398	1,236	1,396	-2,933
25	1,165	1,456	1,437	1,353	-2,666
26	1,475	1,307	1,424	1,402	-2,946
27	1,352	1,456	1,301	1,370	-2,742

São plotados nas imagens 26 e 27 respectivamente, as médias das medições e as razões sinal-ruído MIG *Standard* e MIG CMT Pulsado para os 27 experimentos. Observa-se na escala do eixo das ordenadas o uso do ponto como separador decimal em detrimento da vírgula, o que é justificado por uma limitação do *software* MATLAB R2016a desenvolvido pela *MathWorks* usado para as plotagens.

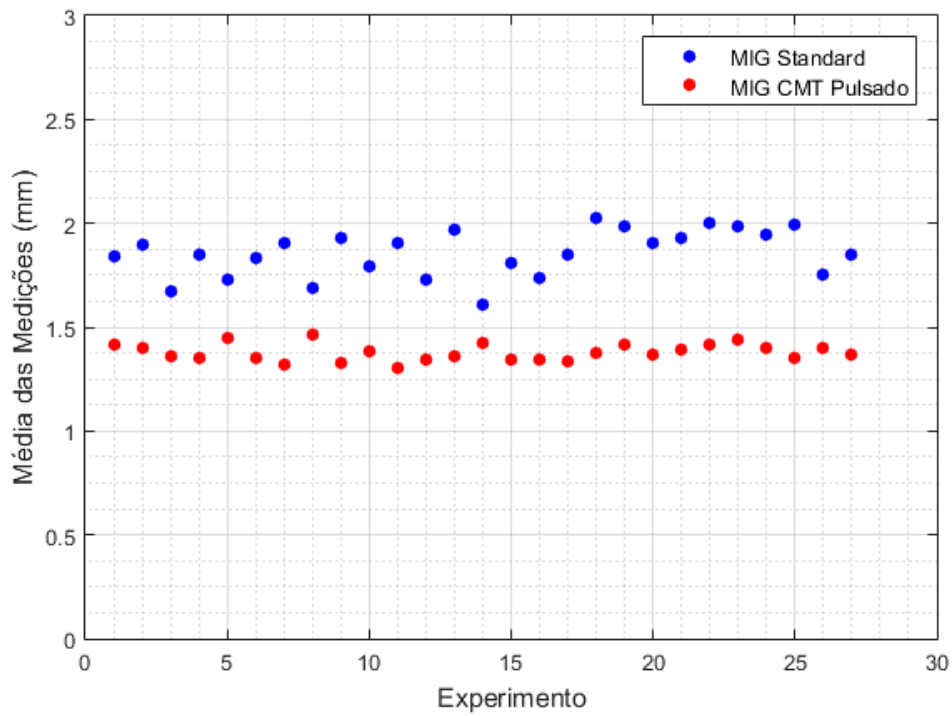


Figura 26: Média das medições dos experimentos para reforço

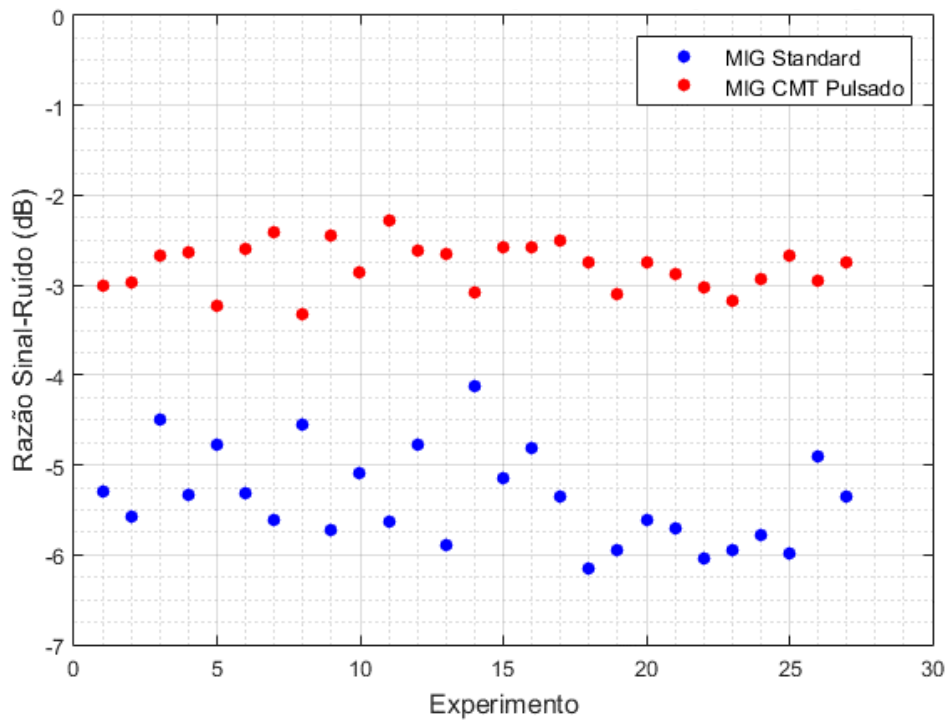


Figura 27: Razão sinal-ruído dos experimentos para reforço

Os valores da razão sinal-ruído médios para cada parâmetro e nível calculados estão descritos nas tabelas 27 e 28, e posteriormente plotados na figura 28 e 29 para MIG *Standard* e MIG CMT Pulsado, respectivamente.

Tabela 27: Razão sinal-ruído média para os níveis dos parâmetros MIG *Standard* para reforço

Parâmetro	Nível	Sinal-ruído médio
A	1	-5,188
	2	-5,219
	3	-5,699
B	1	-5,347
	2	-5,373
	3	-5,386
C	1	-5,197
	2	-5,448
	3	-5,461
D	1	-5,555
	2	-5,166
	3	-5,385
E	1	-5,423
	2	-5,280
	3	-5,403
F	1	-5,354
	2	-5,439
	3	-5,313
G	1	-5,265
	2	-5,699
	3	-5,142
H	1	-5,098
	2	-5,542
	3	-5,465
I	1	-5,610
	2	-5,218
	3	-5,277
J	1	-5,380
	2	-5,498
	3	-5,228
K	1	-5,466
	2	-5,392
	3	-5,247
L	1	-5,340
	2	-5,529
	3	-5,237

Tabela 28: Razão sinal-ruído média para os níveis dos parâmetros MIG CMT Pulsado para reforço

Parâmetro	Nível	Sinal-ruído médio
A	1	-2,811
	2	-2,657
	3	-2,915
B	1	-2,794
	2	-2,879
	3	-2,709
C	1	-2,813
	2	-2,781
	3	-2,789
D	1	-2,773
	2	-2,917
	3	-2,693
E	1	-2,765
	2	-2,909
	3	-2,709
F	1	-2,720
	2	-2,920
	3	-2,743
G	1	-2,873
	2	-2,696
	3	-2,814
H	1	-2,859
	2	-2,747
	3	-2,776
I	1	-2,817
	2	-2,813
	3	-2,753
J	1	-2,935
	2	-2,643
	3	-2,805
K	1	-2,758
	2	-2,836
	3	-2,789
L	1	-2,781
	2	-2,753
	3	-2,849

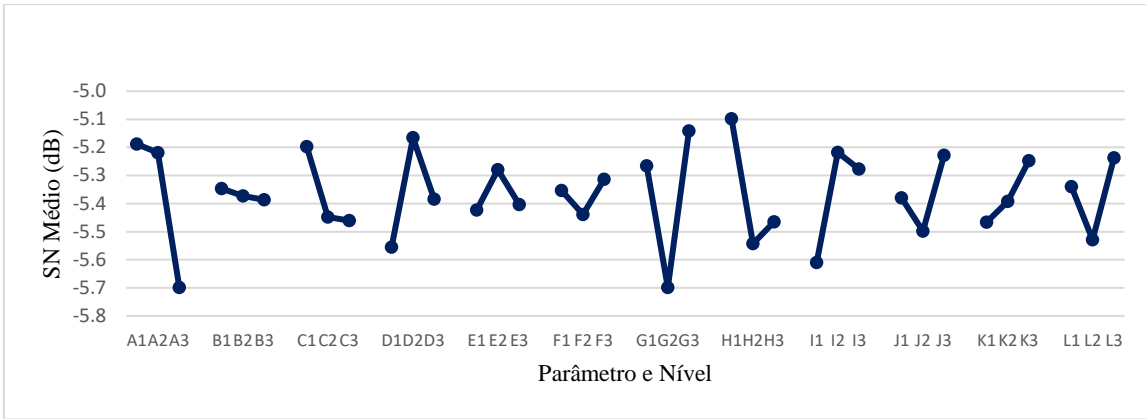


Figura 28: Curva SN média de cada nível para MIG *Standard* para reforço

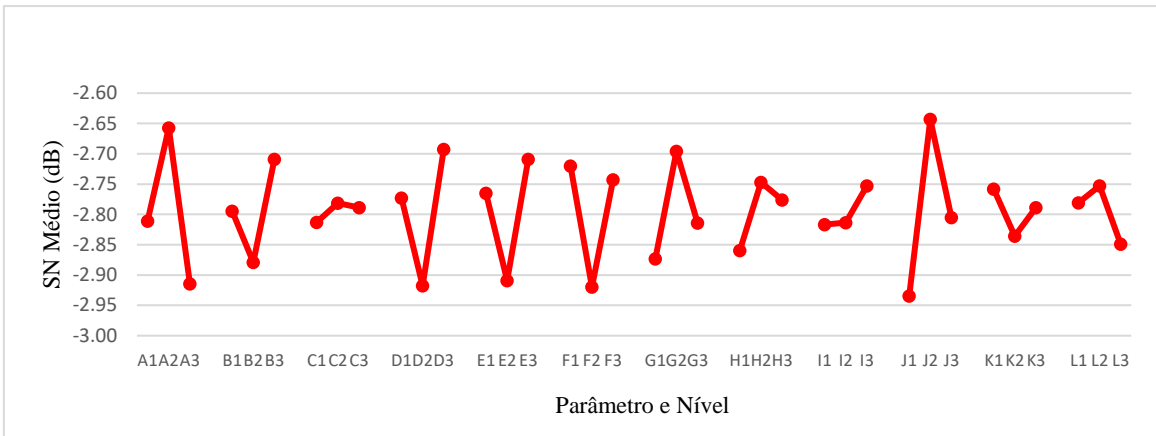


Figura 29: Curva SN média de cada nível para MIG CMT Pulsado para reforço

Os valores máximos da razão sinal-ruído de cada parâmetro, que indicam condições otimizadas, foram coletados e podem ser consultados na tabela 29 para MIG *Standard* e para MIG CMT Pulsado.

Tabela 29: Níveis ótimos para reforço em MIG *Standard* e MIG CMT Pulsado

Método	Níveis Ótimos											
MIG <i>Standard</i>	A1	B1	C1	D2	E2	F3	G3	H1	I2	J3	K3	L3
MIG CMT Pulsado	A2	B3	C2	D3	E3	F1	G2	H2	I3	J2	K1	L2

As medições M1, M2 e M3 para os experimentos de confirmação realizados com a combinação de níveis ótimos para cada parâmetro, a média entre as três e a razão sinal-ruído podem ser vistas na tabela 30 para MIG *Standard* e na tabela 31 para MIG CMT Pulsado.

Tabela 30: Teste de confirmação MIG *Standard* para reforço

Medições	Teste
M1 (mm)	1,166
M2 (mm)	1,168
M3 (mm)	1,172
Média (mm)	1,169
SN (dB)	-1,354

Tabela 31: Teste de confirmação MIG CMT Pulsado para reforço

Medições	Teste
M1 (mm)	1,376
M2 (mm)	1,405
M3 (mm)	1,388
Média (mm)	1,390
SN (dB)	-2,859

A razão sinal-ruído estimada teoricamente através de equacionamento para os experimentos ótimos foi -3,603 dB para MIG *Standard* e -1,884 dB para MIG CMT Pulsado. Na tabela 32 são apresentados os resultados da análise de variância para MIG *Standard* e na tabela 33 os resultados para MIG CMT Pulsado.

Tabela 32: ANOVA para MIG *Standard* para reforço

Fonte	GDL	SQ	QM	Valor F	Valor P	Contribuição (%)
A	2	1,47742	0,73871	4,27	0,046	20,088
C	2	0,39844	0,19922	1,15	0,354	5,418
D	2	0,68509	0,34255	1,98	0,188	9,315
E	2	0,10785	0,05393	0,31	0,739	1,466
F	2	0,07386	0,03693	0,21	0,811	1,004
G	2	1,54054	0,77027	4,46	0,041	20,947
H	2	1,01418	0,50709	2,93	0,099	13,790
J	2	0,32882	0,16441	0,95	0,419	4,471
ERRO	10	1,72837	0,17284			23,501
TOTAL	26	7,35459				

Tabela 33: ANOVA para MIG CMT Pulsado para reforço

Fonte	GDL	SQ	QM	Valor F	Valor P	Contribuição (%)
A	2	0,30179	0,150897	5,25	0,028	16,519
C	2	0,005	0,002498	0,09	0,918	0,274
D	2	0,23396	0,116981	4,07	0,051	12,806
E	2	0,19169	0,095844	3,33	0,078	10,492
F	2	0,21481	0,107407	3,73	0,062	11,758
G	2	0,14664	0,073322	2,55	0,127	8,026
H	2	0,06131	0,030653	1,07	0,381	3,356
J	2	0,38407	0,192035	6,68	0,014	21,022
ERRO	10	0,28768	0,028768			15,746
TOTAL	26	1,82696				

4.2. ANÁLISE E DISCUSSÃO

Assim como nos resultados, este tópico também apresenta subseções de acordo com a característica avaliada para facilitar a compreensão. Entretanto, é necessário listar algumas fontes de erro durante todo o processo. Talvez a mais clara delas seja o erro absoluto das medições do microscópio, que é o mesmo para todas as medições. Já o erro relativo varia conforme o tamanho da grandeza medida.

Erros referentes a todos os outros instrumentos utilizados também estão presentes, contudo não são passíveis de serem mensurados, como por exemplo, a dificuldade em se cortar, lixar e polir o cordão de solda perfeitamente perpendicular com os equipamentos disponíveis, os desvios entre os valores reais e os nominais dos parâmetros de soldadura e a variação das condições ambientais.

Erros intrínsecos aos métodos também estão presentes, como por exemplo na atribuição de parâmetros as colunas e atribuição dos níveis, que devido à complexidade do problema podem trazer consigo fontes de incerteza.

Hipóteses assumidas de modo a simplificar os cálculos são outra fonte de erro importante de ser destacado, como a não consideração de interação entre fatores. Dentre estes, ainda existe a possibilidade de erro por falha humana, que por muitas vezes não é constatado e passa despercebido.

Todas as possíveis fontes de erro foram minimizadas sempre que possível. Os resultados mostram coerência, confirmando sua veracidade e afastando o eventual descrédito das conclusões alcançadas.

4.2.1. PENETRAÇÃO

Como pode ser observado na tabela 7, para a penetração do método MIG *Standard*, dentre os 27 experimentos, o valor mais próximo do desejado, que é de 5 mm de acordo com a espessura da chapa, dentre as médias das medições foi obtido no experimento de número 14, medindo 2,577 mm com uma razão sinal-ruído de 16,569 dB. Porém, a maior razão sinal-ruído, igual a 36,585 dB, foi decorrente do experimento de número 12, que obteve uma penetração de 2,497 mm, a segunda maior medição para o método. Isso significa bom equilíbrio entre maior penetração e menor variabilidade na resposta devido ao ruído.

No método MIG CMT Pulsado, na tabela 8, a maior medição foi de 0,879 mm no experimento 12, com uma razão sinal-ruído de 21,313 dB, longe de estar bem colocada

nesse quesito, sendo aproximadamente metade dos melhores valores encontrados, 39,448 dB e 0,656 mm e 39,081 dB e 0,610 mm para os experimentos 11 e 22, respectivamente.

Observa-se na figura 18 que a penetração é superior para o método MIG *Standard*, e que este sofre uma influência mais acentuada à variação dos parâmetros do que o método MIG CMT Pulsado. Já para a razão sinal-ruído, plotadas na figura 19, pode-se notar que houve uma alternância de melhores valores entre os dois métodos, com leve superioridade do método MIG CMT Pulsado, que como observado anteriormente apresenta menor variância.

Nas tabelas 9 e 10 estão, respectivamente, os valores exatos das razões sinal-ruído médias para o método MIG *Standard* e MIG CMT Pulsado para cada nível relativamente ao seu parâmetro. Estes valores podem ser visualmente melhor interpretados pelos gráficos nas figuras 20 e 21. Este também confirma a escolha da fórmula de razão sinal-ruído nominal é melhor, em detrimento da fórmula de razão sinal-ruído nominal é melhor (padrão), sendo que a não linearidade de comportamento dentro dos níveis é um forte indício da inexistência de fatores de escala, onde a média e o desvio padrão variam proporcionalmente. Os maiores valores para cada parâmetro podem ser vistos na tabela 11 para os dois métodos e pode-se constatar que ambas as combinações não estão presentes dentre as 27 já experimentadas, o que implicou na execução de experimentos de confirmação.

De acordo com a tabela 12, a penetração atingida pelo teste de confirmação do método MIG *Standard* foi de 1,904 mm com um sinal-ruído de 33,690 dB, abaixo do valor teórico esperado de 39,601 dB, o que implica um erro percentual de 17,545%, que, para um processo de soldagem, é ainda aceitável e coerente.

Observa-se que o experimento 12 obteve melhores resultados tanto para o valor de penetração (2,497 mm), quanto para a razão sinal-ruído (36,585 dB), quando comparado ao experimento de confirmação que utiliza a combinação de parâmetros e níveis apontadas como ótimas, o que indica que o método exige mais iterações para se aproximar do resultado.

No método MIG CMT Pulsado, observa-se na tabela 13, uma penetração de 0,763 mm e uma razão sinal-ruído de 37,673 dB para o teste de confirmação, também abaixo do valor teórico estimado de 44,983 dB, indicando um percentual de erro de 19,404%, pouco maior que o erro do método anterior, porém ainda aceitável. Neste caso, nenhum dos 27 experimentos realizados demonstrou superioridade em relação ao experimento ótimo para os dois quesitos.

Comparando-se os valores dos melhores experimentos de cada método, ou seja, o experimento 12 do método MIG *Standard* e o experimento de confirmação do método MIG CMT Pulsado, nota-se que os valores da razão sinal-ruído são muito próximos entre si, porém a penetração é consideravelmente superior para o primeiro método.

Na análise de variância, presentes nas tabelas 14 e 15, como já exposto previamente, os parâmetros: pós-fluxo de gás, corrente final e *slope 2*, foram desconsiderados devido a constatação da pouca ou nula influência que estes exercem em relação as características da parte do meio do cordão que foi avaliada neste trabalho.

Dentre os parâmetros remanescentes, para MIG *Standard*, destacam-se os parâmetros valor nominal do gás, com contribuição de 26,62% na penetração, seguido pelo tempo inicial com 23,819%, correção anti-adesão com 16,177% e *slope 1* com 5,498%, os demais apresentam influência inferior a 5%. Para MIG CMT Pulsado, o valor nominal do gás também é o mais influente com 13,515% de contribuição, seguido pela velocidade de alimentação com 12,167%, *slope 1* com 7,175% e os demais com contribuição abaixo de 5%.

Dos parâmetros avaliados dentro dos ajustes de processamento, para a penetração, o valor nominal do gás se mostrou como dominante na determinação do resultado, aparecendo como mais influente em ambos os casos, MIG *Standard* e MIG CMT Pulsado. Por outro lado, o parâmetro fator gás, obteve o menor percentual de contribuição em ambos os casos, MIG *Standard* e MIG CMT Pulsado. A velocidade de alimentação apresentou baixos valores para todos os casos exceto a penetração do MIG CMT Pulsado.

4.2.2. LARGURA DE CORDÃO

Na tabela 16, para a largura no método MIG *Standard*, dentre os 27 experimentos, o valor mais próximo do desejado, que é de 5 mm de acordo com a espessura da chapa, dentre as médias das medições foi obtido no experimento de número 13, medindo 7,564 mm, porém com uma razão sinal-ruído baixa, igual a 4,061 dB. A maior razão sinal-ruído foi encontrada no experimento 22 com um valor de 26,211 dB que apresentou largura de 8,443 dB. Para MIG CMT Pulsado, como visto na tabela 17 a melhor medição foi de 5,656 mm no experimento 11, porém o sinal de 13,165 dB é baixo, e vai contra os interesses do trabalho.

Observa-se na figura 22 que a largura é superior para o método MIG *Standard*, e que este sofre influência mais acentuada à variação dos parâmetros do que o método MIG

CMT Pulsado. Já para a razão sinal-ruído, plotadas na figura 23 pode-se notar que houve uma alternância de melhores valores entre os dois métodos, com superioridade do método MIG CMT Pulsado, seguindo o comportamento constatado para a penetração.

Nas tabelas 18 e 19 estão, respectivamente, os valores exatos das razões sinal-ruído médias para o método MIG *Standard* e MIG CMT Pulsado para cada nível relativo ao seu parâmetro. Estes valores podem ser visualmente melhor interpretados pelos gráficos nas figuras 24 e 25, e este também confirma a escolha da fórmula de razão sinal-ruído nominal é melhor em detrimento da fórmula de razão sinal-ruído nominal é melhor (padrão), sendo que a não linearidade de comportamento dentro dos níveis é um forte indício da inexistência de fatores de escala, onde a média e o desvio padrão variam proporcionalmente. Os maiores valores para cada parâmetro podem ser vistos na tabela 20 para os dois métodos. Pode-se constatar que ambas as combinações não estão presentes dentre as 27 já experimentadas, o que implicou na execução de experimentos de confirmação.

De acordo com a tabela 21, a largura atingida pelo teste de confirmação do método MIG *Standard* foi de 8,25 mm com um sinal-ruído de 19,047 dB, abaixo do valor teórico esperado de 29,652 dB, o que implica um erro percentual de 55,678%, que indica a necessidade de uma ou mais iterações do método para se aproximar do resultado satisfatório. Observa-se que o experimento 23 mostrou comportamento muito semelhante ao teste de confirmação, com largura de 8,264 mm e razão sinal-ruído de 18,693 dB.

No método MIG CMT Pulsado, observa-se na tabela 22, uma largura de 6,349 mm e uma razão sinal-ruído de 16,411 dB para o teste de confirmação, muito abaixo do valor teórico estimado de 35,288 dB, indicando um demasiado erro percentual de 115,026%. Os experimentos 1, 3, 5, 7, 12, 13, 15, 16, 18, 25 e 26 obtiveram melhor desempenho que o experimento ótimo, dentre eles destacando-se o experimento 5, que apresentou largura de 5,882 mm e sinal-ruído de 25,903 dB. A grande quantidade de experimentos que foram superiores ao experimento de confirmação vai de acordo com o grande erro encontrado.

Comparando-se os valores dos melhores experimentos de cada método, ou seja, o experimento de confirmação do método MIG *Standard* e o experimento 5 do método MIG CMT Pulsado, o segundo apresenta melhores resultados tanto para a penetração, que mais se aproxima da espessura da chapa, quanto para a razão sinal-ruído.

Na análise de variância, presentes nas tabelas 23 e 24, como já explicado previamente, os parâmetros: pós-fluxo de gás, corrente final e *slope* 2, foram

desconsiderados devido a constatação da pouca ou nula influência que estes exercem em relação as características da parte do meio do cordão que foi avaliada neste trabalho.

Dentre os parâmetros remanescentes, para *MIG Standard*, destacam-se os parâmetros *slope 1*, com contribuição de 11,5% na largura do cordão, seguido pelo valor nominal do gás com 8,615%, corrente inicial com 7,626%, pré-fluxo de gás com 6,644%, e os demais apresentam influência inferior a 5%. Para *MIG CMT Pulsado*, o valor nominal do gás é o mais influente com 20,574% de contribuição, seguido pela corrente inicial com 17,946%, *slope 1* com 11,22% e os demais com contribuição abaixo de 10%.

A dominância do fator valor nominal do gás se estendeu também a largura de cordão, onde foi a mais influente para *MIG CMT Pulsado* e na segunda colocação para *MIG Standard*, neste último, a primeira colocação ficou com o *slope 1*, que apareceu novamente entre os três mais influentes para largura do método *MIG CMT Pulsado*. Na largura de cordão a corrente inicial apareceu para ambos os métodos, em terceiro para *MIG Standard* e segundo para *MIG CMT*. Por outro lado, o parâmetro fator gás obteve o menor percentual de contribuição para largura do *MIG Standard* e a correção anti-adesão para o *MIG CMT Pulsado*, onde é a segunda mais influente.

4.2.3. REFORÇO

Como pode ser observado na tabela 25, para o reforço no método *MIG Standard*, dentre os 27 experimentos, mostrou-se superior o experimento de número 14, que apresentou a menor das médias das medições, medindo 1,608 mm e também a maior razão sinal-ruído de -4,127 dB. No método *MIG CMT Pulsado*, a menor medição foi de 1,301 mm no experimento 11, como pode ser visto na tabela 26, com uma razão sinal-ruído de -2,288 dB, também a menor dentre as 27 combinações.

Observa-se na figura 26 que o reforço é menor para o método *MIG CMT Pulsado*, e que este sofre uma influência menos acentuada à variação dos parâmetros do que o método *MIG Standard*. Para a razão sinal-ruído, plotadas na figura 27 pode-se notar que o método *MIG CMT Pulsado* foi superior em todas as medições, diferentemente dos comportamentos presentes nos gráficos para penetração e largura de cordão, onde havia alternância.

Nas tabelas 27 e 28 estão respectivamente os valores exatos das razões sinal-ruído médias para o método *MIG Standard* e *MIG CMT Pulsado* para cada nível relativamente ao seu parâmetro. Estes valores podem ser visualmente melhor interpretados pelos

gráficos nas figuras 28 e 29. Os maiores valores para cada parâmetro podem ser vistos na tabela 29 para os dois métodos. Pode-se constatar que ambas as combinações não estão presentes dentre as 27 já experimentadas, o que implicou na realização de experimentos de confirmação.

De acordo com a tabela 30, o reforço obtido no teste de confirmação do método MIG *Standard* foi de 1,169 mm com um sinal-ruído de -1,354 dB, acima do valor teórico esperado de -3,603 dB, o que implica um erro percentual exorbitante de 166,1% embora os resultados experimentais sejam mais otimistas do que a previsão teórica. Neste caso, o experimento de confirmação realmente foi superior a todos os demais, o que aponta que houve otimização, mas o método de estimar a razão sinal-ruído teoricamente, precisa ser revisto.

No método MIG CMT Pulsado, observa-se na tabela 31, um reforço de 1,39 mm e uma razão sinal-ruído de -2,859 dB para o teste de confirmação, abaixo do valor teórico estimado de -1,884 dB, indicando um percentual de erro de 34,103%, erro este que pode ser reduzido com a realização de mais iterações do método de Taguchi. Neste caso, alguns experimentos se mostraram melhores que o teste de confirmação, sendo o melhor deles o experimento 11.

Comparando-se os valores dos melhores experimentos de cada método, ou seja, o experimento de confirmação do método MIG *Standard* e o experimento 11 do método MIG CMT Pulsado, nota-se a superioridade do segundo método para razão sinal-ruído e para uma menor medida de reforço.

Na análise de variância, presentes nas tabelas 32 e 33, como já explicado previamente, os parâmetros: pós-fluxo de gás, corrente final e *slope* 2, foram desconsiderados devido a constatação da pouca ou nula influência que estes exercem em relação as características da parte do meio do cordão que foi avaliada neste trabalho.

Dentre os parâmetros remanescentes, para MIG *Standard*, destacam-se os parâmetros corrente inicial, com contribuição de 20,947% no reforço, seguido pelo pré-fluxo de gás com 20,088%, *slope* 1 com 13,79%, correção anti-adesão com 9,315%, velocidade de alimentação com 5,418% e os demais apresentam influência inferior a 5%. Para MIG CMT Pulsado, o tempo inicial é o mais influente com 21,022% de contribuição, seguido pelo pré-fluxo de gás com 16,519%, correção anti-adesão com 12,806%, fator gás com 11,758%, valor nominal do gás com 10,492% e os demais com contribuição abaixo de 10%. Para o reforço os resultados foram menos fáceis de se relacionar, sendo

que o único que se repetiu foi o pré-fluxo de gás. Para MIG *Standard* a corrente inicial foi o mais significativo e para o MIG CMT Pulsado o tempo inicial.

CAPÍTULO 5

5.1. CONCLUSÕES

De modo a refinar os resultados, seria viável a realização de mais iterações com o método de Taguchi. Porém, já é possível perceber uma melhoria nos resultados, sendo que o método das matrizes ortogonais de Taguchi juntamente com as razões sinal-ruído se mostraram eficientes em apontar a combinação de níveis e parâmetros ótimos em metade dos casos avaliados, sendo eles a penetração para o método MIG CMT Pulsado e a largura de cordão e reforço do método MIG *Standard*.

Para a penetração, o método que apresentou o resultado mais próximo do desejado e menos propenso a variabilidade foi o método MIG *Standard* com a combinação de parâmetros do experimento de número 12 e para MIG CMT Pulsado foi o do experimento de confirmação. Para largura de cordão o melhor resultado foi para o método MIG CMT Pulsado no experimento 5 seguido pelo experimento de confirmação do MIG *Standard*. Já para o reforço, a melhor resposta foi do experimento de número 11 do método MIG CMT Pulsado e em sequência o experimento de confirmação MIG *Standard*.

A análise de variância mostra-se útil principalmente se for de interesse a realização de mais iterações do método, refinando os parâmetros de escolha e seus respectivos níveis, focando apenas nos de maior interesse e influência na resposta desejada.

Dentre os parâmetros avaliados dentro dos ajustes de processamento, para a penetração, o valor nominal do gás se mostrou como dominante na determinação do resultado, aparecendo como mais influente em ambos os casos, MIG *Standard* e MIG CMT Pulsado. A dominância do fator se estendeu também a largura de cordão, onde foi a mais influente para MIG CMT Pulsado e na segunda colocação para MIG *Standard*. Neste último, a primeira colocação ficou com o *slope* 1, que apareceu outras duas vezes entre os três mais influentes, tanto para largura como penetração do método MIG CMT Pulsado.

Em contrapartida, o parâmetro fator gás, obteve o menor percentual de contribuição em quatro casos, sendo eles penetração, largura e reforço do MIG *Standard* e a penetração do MIG CMT Pulsado, isso devido a não utilização de gases que não haviam sido pré-programados para o metal de adição utilizado, indicando que seria um parâmetro a ser descartado em estudos futuros assim como a velocidade de alimentação, que apresentou baixos valores para todos os casos, exceto a penetração do MIG CMT Pulsado.

Para o reforço os resultados foram menos fáceis de se relacionar, sendo que o único que se repetiu foi o pré-fluxo de gás; para MIG *Standard* a corrente inicial foi o mais significativo e para o MIG CMT Pulsado o tempo inicial.

De um modo geral, a geometria dos cordões soldados pelo método MIG *Standard* se mostram mais aptos para união de juntas soldadas, e os cordões soldados pelo método MIG CMT Pulsado, devido as mais baixas penetrações, se assemelham mais a uma geometria desejada para uma soldadura de revestimento.

5.2. PROPOSTAS PARA TRABALHOS FUTUROS

A área da robotização de soldaduras em alumínio ainda carece muito de esforços e de bibliografia específica. Os trabalhos futuros podem ser complementares a este, podendo ser de otimização dos métodos, realização de mais iterações, refinamento dos níveis e parâmetros, simulação em métodos numéricos para fins de comparação, incremento de variáveis, entre outros. De imediato, seria aconselhável encontrar um balanço entre a otimização da largura de cordão, penetração e reforço, ou seja, uma otimização de múltiplos objetivos.

Variações no material de base e de adição também seriam interessantes, tanto dentre outras ligas de alumínio quanto outros materiais metálicos. Comparações com outros métodos de soldadura, influência da temperatura, mudanças na trajetória do robô, e a realização dos testes em geometrias mais complexas como solda chapa-tubo ou tubo-tubo nas mais diferentes posições. Parâmetros para abrir e fechar o arco também proporcionariam um interessante estudo, já que as características do início e do final do cordão são bem discrepantes do restante da solda.

De acordo com a aplicação e as solicitações às quais o cordão soldado será exposto, é possível ter uma ideia de quais as características mais importantes a serem avaliadas. Neste trabalho foi feita uma análise visual e macroscópica, porém muitos outros testes poderiam ser desempenhados para avaliar o produto obtido nos experimentos. Poderiam ter sido avaliados outros fatores geométricos do cordão, defeitos como poros, salpicos, mordeduras, trincas ou outras discontinuidades. Testes para avaliar distorção, resistência a tração, tensões residuais, fadiga, e outras inúmeras variações de propriedades dos materiais devido ao processo de fabricação também seriam interessantes.

Por fim, uma análise de viabilidade econômica da implementação de robotização de soldadura em uma linha de produção também seria uma mais valia para os esforços já feitos na área e um incentivo a mais para o uso desta tecnologia.

REFERÊNCIAS

- [1] Pires, J. N., Loureiro, A., Godinho, T., Ferreira, P., Fernando, B., & Morgado, J. (2003). Welding robots. *IEEE robotics & automation magazine*, 10(2), 45-55;
- [2] João, R., José, G., & Nuno, M. Projeto de automatização de processos de soldadura de estruturas hiperestáticas em ligas de alumínio. *Robótica*, 106, 1;
- [3] Baizid, K., Yousnadj, A., Meddahi, A., Chellali, R., & Iqbal, J. (2015). Time scheduling and optimization of industrial robotized tasks based on genetic algorithms. *Robotics and Computer-Integrated Manufacturing*, 34, 140-150;
- [4] Iqbal, J., Khan, Z. H., & Khalid, A. (2017). Prospects of robotics in food industry. *Food Science and Technology*, 37(2), 159-165;
- [5] Iqbal, J., Ullah, M. I., Khan, A. A., & Irfan, M. (2015). Towards sophisticated control of robotic manipulators: An experimental study on a pseudo-industrial arm. *Strojniški vestnik-Journal of Mechanical Engineering*, 61(7-8), 465-470;
- [6] Pan, Z., Polden, J., Larkin, N., Van Duin, S., & Norrish, J. (2012). Recent progress on programming methods for industrial robots. *Robotics and Computer-Integrated Manufacturing*, 28(2), 87-94;
- [7] Horikawa, O., Maruyama, N., & Santos Filho, D. J. (2002). Seleção de Robôs Industriais. *Robótica Industrial: Aplicação na Indústria de Manufatura e de Processos*, 1, 126-138;
- [8] Hasegawa, Y. (1985). Evaluation and economic justification. Handbook of Industrial Robots. Wiley;
- [9] Sapakal, S. V., & Telsang, M. T. (2012). Parametric optimization of MIG welding using Taguchi design method. *International Journal of Advanced Engeneering Research and Studies*, 1(4), 28-30;
- [10] Kim, I. S., Son, J. S., & Yarlagadda, P. K. (2003). A study on the quality improvement of robotic GMA welding process. *Robotics and Computer-Integrated Manufacturing*, 19(6), 567-572;
- [11] Holbery, J., & Houston, D. (2006). Natural-fiber-reinforced polymer composites in automotive applications. *JOM Journal of the Minerals, Metals and Materials Society*, 58(11), 80-86;
- [12] Kulekci, M. K. (2008). Magnesium and its alloys applications in automotive industry. *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 39(9), 851-865;

- [13] Carle, D., & Blount, G. (1999). The suitability of aluminium as an alternative material for car bodies. *Materials & design*, 20(5), 267-272;
- [14] Cole, G. S., & Sherman, A. M. (1995). Lightweight materials for automotive applications. *Materials characterization*, 35(1), 3-9;
- [15] Lakshminarayanan, A. K., Balasubramanian, V., & Elangovan, K. (2009). Effect of welding processes on tensile properties of AA6061 aluminium alloy joints. *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 40(3), 286-296;
- [16] Kohandehghan, A. R., & Serajzadeh, S. (2012). Experimental investigation into the effects of weld sequence and fixture on residual stresses in arc welding process. *Journal of materials engineering and performance*, 21(6), 892-899;
- [17] Aluminium in transport. (2014). European Aluminium Association Report;
- [18] Gourd, L. M. (1995). Fundamentals of Welding - Principles of Welding Technology;
- [19] Livieri, P., & Lazzarin, P. (2005). Fatigue strength of steel and aluminium welded joints based on generalised stress intensity factors and local strain energy values. *International Journal of Fracture*, 133(3), 247-276.
- [20] Barnes, T. A., & Pashby, I. R. (2000). Joining techniques for aluminium spaceframes used in automobiles: Part I—solid and liquid phase welding. *Journal of materials processing technology*, 99(1), 62-71;
- [21] Kalpakjian, S., & Schmid, S. R. (2014). Manufacturing engineering and technology;
- [22] American Welding Society Code. (1985);
- [23] Pinto-Lopera, J. E., ST Motta, J. M., & Absi Alfaro, S. C. (2016). Real-time measurement of width and height of weld beads in GMAW processes. *Sensors*, 16(9), 1500;
- [24] Costa, T. F., Filho, E. B., Arevalo, H. D. H., & Vilarinho, L. O. (2012). Avaliação do Processo MIG/MAG Curto-Circuito Convencional e Controlado para a Soldagem de Dutos de Aço Carbono em Passe Único. *Soldagem & Inspeção*, 17(4), 13;
- [25] Correa, A. C., & Trevisan, R. E. (2001). Influência dos Parâmetros de Soldagem MIG Pulsada e Convencional na Morfologia do Cordão e na Microestrutura. In *Primeiro Congresso Brasileiro de Engenharia de Fabricação—COBEF*;
- [26] Pal, S., Malviya, S. K., Pal, S. K., & Samantaray, A. K. (2009). Optimization of quality characteristics parameters in a pulsed metal inert gas welding process

- using grey-based Taguchi method. *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 44(11), 1250-1260;
- [27] Pickin, C. G., & Young, K. (2006). Evaluation of cold metal transfer (CMT) process for welding aluminium alloy. *Science and Technology of Welding and Joining*, 11(5), 583-585;
- [28] Schörghuber, M. (2015). *U.S. Patent No. 9,035,220*. Washington, DC: U.S. Patent and Trademark Office;
- [29] Dutra, J. C., Silva, G. E., Henrique, R., & Marques, C. (2013). Características de fusão e potência de soldagem com a transferência MIG-CMT versus MIG convencional para Alumínio 5183. *Melting and welding power characteristics of MIG CMT versus Conventional MIG for Aluminum, 5183*, 012-8;
- [30] Pessoa, A. (2010) Seleção de Parâmetros Através do Método Taguchi para Soldagem de Revestimento com Ligas de Níquel pelo Processo MIG/MAG. *Soldagem & Inspeção*, 15, 317-324;
- [31] Miranda, E. D., Silva, C. C., Motta, M. F., Miranda, H. C., & Farias, J. P. (2015) Avaliação do uso do tecimento sobre o nível de diluição e geometria do cordão de solda na soldagem TIG com alimentação automática de arame frio. *Soldagem & Inspeção*, 20(2), 180-190;
- [32] Gomes, J. H. F., Costa, S. C., Paiva, A. P., & Balestrassi, P. P. (2011). Otimização de múltiplos objetivos na soldagem de revestimento de chapas de aço carbono ABNT 1020 utilizando arame tubular inoxidável austenítico. *Soldagem & Inspeção*, 16(3), 232-242;
- [33] Fortes, C., & Vaz, C. (2005). Soldagem MIG/MAG. Apostila ESAB;
- [34] Teng, T. L., & Lin, C. C. (1998). Effect of welding conditions on residual stresses due to butt welds. *International Journal of Pressure Vessels and Piping*, 75(12), 857-864;
- [35] Teng, T. L., Chang, P. H., & Tseng, W. C. (2003). Effect of welding sequences on residual stresses. *Computers & structures*, 81(5), 273-286;
- [36] Teng, T. L., Fung, C. P., Chang, P. H., & Yang, W. C. (2001). Analysis of residual stresses and distortions in T-joint fillet welds. *International Journal of Pressure Vessels and Piping*, 78(8), 523-538;
- [37] Matrukanitz, R. P. (1990). Selection and weldability of heat-treatable aluminum alloys. *ASM Handbook-Welding, Brazing and Soldering*, 6, 528-536;

- [38] Patil, P. C., & Shelke, R. D. (2015). Review on welding parameter effects on TIG welding of aluminium alloy. *International Journal of Engineering Research and General Science*, 3(3), 1479-1486;
- [39] Fronius. (2007) Fronius RCU 5000i - Operating Instructions, Remote Control;
- [40] ASM Handbook Volume 2: Properties and Selection: Nonferrous Alloys and Special-Purpose Materials. (1990) ASM international;
- [41] ALCAN. (1993) Manual de Soldagem. Alcan Alumínio do Brasil S/A;
- [42] Rohde, R. A. (2010). Metalografia–Preparação de Amostras. Uma abordagem prática. Universidade Regional Integrada, Laboratório de ensaios mecânicos e materiais;
- [43] Yan, B., Gao, H. M., Lin, W., & Neng, C. A. O. (2010). Influence of plasma-MIG welding parameters on aluminum weld porosity by orthogonal test. *Transactions of Nonferrous Metals Society of China*, 20(8), 1392-1396;
- [44] Yang, W. P., & Tarng, Y. S. (1998). Design optimization of cutting parameters for turning operations based on the Taguchi method. *Journal of materials processing technology*, 84(1), 122-129;
- [45] Pimenta, C. D., Silva, M. B., Claro, F. A. E., & Ribeiro, R. B. (2012). Método Taguchi aplicado na identificação dos fatores causadores da descarbonetação do arame de aço SAE 51B35, durante tratamento térmico de esferoidização. *Gepros: Gestão da Produção, Operações e Sistemas*, 7(2), 97;
- [46] Tarng, Y. S., Juang, S. C., & Chang, C. H. (2002). The use of grey-based Taguchi methods to determine submerged arc welding process parameters in hardfacing. *Journal of Materials Processing Technology*, 128(1), 1-6;
- [47] Motorcu, A. R. (2010). The optimization of machining parameters using the Taguchi method for surface roughness of AISI 8660 hardened alloy steel. *Journal of Mechanical Engineering*, 56(6), 391-401;
- [48] Karna, S. K., & Sahai, R. (2012). An overview on Taguchi method. *International Journal of Engineering and Mathematical Sciences*, 1(1), 1-7;
- [49] Hsiao, Y. F., Tarng, Y. S., & Huang, W. J. (2007). Optimization of plasma arc welding parameters by using the Taguchi method with the grey relational analysis. *Materials and Manufacturing Processes*, 23(1), 51-58;
- [50] Dhas, J. E. R., & Dhas, S. J. H. (2012). A review on optimization of welding process. *Procedia Engineering*, 38, 544-554;

- [51] Taguchi, G., & Konishi, S. (1987). Taguchi Methods: Orthogonal Arrays and Linear Graphs-Tools for Quality Engineering. American Supplier Institute, Center for Taguchi Methods;
- [52] Taguchi, G. (1986). Introduction to quality engineering: designing quality into products and processes;
- [53] Roy, R. K. (2001). Design of experiments using the Taguchi approach;
- [54] Philip, J. R. (1988). Taguchi techniques for quality engineering;
- [55] <https://support.minitab.com/pt-br/minitab/18/help-and-how-to/modeling-statistics/doe/supporting-topics/taguchi-designs/what-is-the-signal-to-noise-ratio/>, consultado a 12 de maio de 2017;
- [56] Nalbant, M., Gökkaya, H., & Sur, G. (2007). Application of Taguchi method in the optimization of cutting parameters for surface roughness in turning. *Materials & design*, 28(4), 1379-1385;
- [57] Wadsworth, H. M. (1998). Handbook of statistical methods for engineers and scientists;
- [58] Alcoa Alumínio. (2010) Perfis extrudados de alumínio, Ligas e Têmperas de Extrusão.

ANEXO I – EXEMPLO DO CÓDIGO DO ROBÔ

```
/JOB
//NAME SEQUENCIA-1-6
//POS
///NPOS 75,0,75,0,0,0
///TOOL 10
//POSTYPE PULSE
//PULSE
C00000=0,0,0,0,0,0
C00001=-13009,41932,5258,-40665,-72654,47598
C00002=-12909,71096,-5789,-47724,-56611,55132
C00003=-12887,78897,-4265,-49278,-54524,56384
C00004=-12347,87289,6689,-48175,-55948,55275
C00005=-12347,83355,6620,-47228,-57307,54487
C00006=-16337,75481,-3442,-47214,-57416,56163
C00007=-16267,80494,-2329,-48131,-56090,56897
C00008=-15588,88931,8768,-47133,-57539,55766
C00009=-15588,85688,8684,-46416,-58666,55142
C00010=-19070,77956,-1283,-46447,-58526,56697
C00011=-19153,82150,-154,-47077,-57541,57278
C00012=-18359,90665,11090,-46176,-59015,56137
C00013=-18359,87366,11006,-45480,-60181,55521
C00014=-13728,75257,-4570,-48162,-55996,55853
C00015=-13634,79129,-4022,-49028,-54845,56515
C00016=-13060,87598,7040,-47942,-56280,55396
C00017=-13060,84569,6957,-47228,-57316,54798
C00018=-17281,77688,-1900,-47023,-57667,56426
C00019=-17095,80855,-1824,-47814,-56504,57012
C00020=-16379,89412,9399,-46844,-57958,55878
C00021=-16379,86130,9315,-46134,-59105,55252
C00022=-20104,78321,-756,-46087,-59031,56860
C00023=-19914,82718,602,-46757,-57961,57363
C00024=-19095,91237,11819,-45895,-59420,56232
C00025=-19095,87313,11745,-45107,-60826,55502
C00026=-11577,94859,24635,-45195,-60636,52352
C00027=-11565,102151,26545,-46245,-58803,53311
C00028=-11128,112570,40745,-44962,-61032,51953
C00029=-11128,109043,40662,-44313,-62307,51321
C00030=-14670,99115,27316,-44791,-61543,53252
C00031=-14613,103842,28713,-45402,-60393,53808
C00032=-14062,114464,43265,-44214,-62688,52418
C00033=-14062,111546,43163,-43726,-63739,51914
C00034=-17143,101645,29776,-44201,-62723,53729
C00035=-17225,105650,31189,-44611,-61896,54170
C00036=-16578,116535,46138,-43509,-64265,52756
C00037=-16578,113560,46034,-43034,-65350,52256
C00038=-12319,98807,26114,-45468,-60157,52928
C00039=-12237,102375,26796,-46065,-59120,53442
C00040=-11772,112910,41159,-44795,-61373,52071
C00041=-11772,110188,41060,-44307,-62342,51592
C00042=-15529,101388,29173,-44605,-61893,53453
C00043=-15361,104232,29276,-45166,-60816,53921
C00044=-14779,115033,44043,-43998,-63135,52522
C00045=-14779,112079,43940,-43517,-64204,52016
C00046=-18078,102017,30332,-43936,-63227,53890
C00047=-17916,106288,32071,-44360,-62344,54248
C00048=-17248,117220,47055,-43294,-64710,52839
C00049=-17248,113685,46963,-42763,-66016,52244
C00050=-12207,82504,8592,-46521,-58399,53814
```

C00051=-12191,90001,10271,-47818,-56438,54916
C00052=-11706,99140,22482,-46629,-58193,53706
C00053=-11706,95423,22408,-45832,-59507,52999
C00054=-15459,86777,11056,-46066,-59248,54779
C00055=-15397,91612,12281,-46827,-58008,55423
C00056=-14786,100853,24706,-45737,-59802,54188
C00057=-14786,97784,24617,-45135,-60889,53626
C00058=-18056,89239,13317,-45389,-60384,55286
C00059=-18139,93305,14557,-45907,-59475,55797
C00060=-17424,102687,27211,-44909,-61310,54549
C00061=-17424,99562,27121,-44324,-62434,53992
C00062=-12986,86527,9913,-46875,-57849,54461
C00063=-12898,90225,10513,-47604,-56756,55047
C00064=-12383,99456,22853,-46429,-58527,53826
C00065=-12383,96591,22765,-45830,-59528,53290
C00066=-16359,88985,12717,-45877,-59541,55012
C00067=-16183,91979,12804,-46551,-58424,55538
C00068=-15539,101360,25386,-45486,-60230,54298
C00069=-15539,98253,25296,-44890,-61336,53734
C00070=-19038,89599,13849,-45077,-60887,55448
C00071=-18863,93894,15356,-45623,-59906,55879
C00072=-18125,103293,28003,-44662,-61729,54640
C00073=-18125,99576,27923,-44002,-63082,53979
C00074=0,0,0,0,0

///TOOL 0

EC00000=1047,-103362
EC00001=1047,-103362
EC00002=1047,-103362
EC00003=1047,-103362
EC00004=1047,-103362
EC00005=1047,-103361
EC00006=1047,-103361
EC00007=1047,-103361
EC00008=1047,-103361
EC00009=1047,-103361
EC00010=1047,-103361
EC00011=1047,-103361
EC00012=1047,-103361
EC00013=1047,-103361
EC00014=1047,-103361
EC00015=1047,-103361
EC00016=1047,-103361
EC00017=1047,-103361
EC00018=1047,-103361
EC00019=1047,-103361
EC00020=1047,-103361
EC00021=1047,-103361
EC00022=1047,-103361
EC00023=1047,-103361
EC00024=1047,-103361
EC00025=1047,-103361
EC00026=1047,-103362
EC00027=1047,-103362
EC00028=1047,-103362
EC00029=1047,-103361
EC00030=1047,-103361
EC00031=1047,-103361
EC00032=1047,-103361
EC00033=1047,-103361
EC00034=1047,-103361

EC00035=1047,-103361
 EC00036=1047,-103361
 EC00037=1047,-103361
 EC00038=1047,-103361
 EC00039=1047,-103361
 EC00040=1047,-103361
 EC00041=1047,-103361
 EC00042=1047,-103361
 EC00043=1047,-103361
 EC00044=1047,-103361
 EC00045=1047,-103361
 EC00046=1047,-103361
 EC00047=1047,-103361
 EC00048=1047,-103361
 EC00049=1047,-103361
 EC00050=1047,-103362
 EC00051=1047,-103362
 EC00052=1047,-103362
 EC00053=1047,-103361
 EC00054=1047,-103361
 EC00055=1047,-103361
 EC00056=1047,-103361
 EC00057=1047,-103361
 EC00058=1047,-103361
 EC00059=1047,-103361
 EC00060=1047,-103361
 EC00061=1047,-103361
 EC00062=1047,-103361
 EC00063=1047,-103361
 EC00064=1047,-103361
 EC00065=1047,-103361
 EC00066=1047,-103361
 EC00067=1047,-103361
 EC00068=1047,-103361
 EC00069=1047,-103361
 EC00070=1047,-103361
 EC00071=1047,-103361
 EC00072=1047,-103361
 EC00073=1047,-103361
 EC00074=1047,-103362
 //INST
 ///DATE 2017/04/04 21:07
 ///COMM PRIMEIRO ESTUDO SOLDADURA PLACAS
 ///ATTR SC,RW
 ///GROUP1 RB1
 ///GROUP2 ST1
 NOP
 MOVJ C00000 VJ=50.00 +MOVJ EC00000 VJ=80.00
 MOVJ C00001 VJ=50.00 +MOVJ EC00001 VJ=80.00
 MOVJ C00002 VJ=50.00 +MOVJ EC00002 VJ=50.00
 ARCSET ASF#(1)
 TIMER T=0.10
 MOVL C00003 V=50.00 +MOVJ EC00003 VJ=50.00 //#####PRG 1 START
 ARCON ASF#(1)
 MOVL C00004 V=15.0 +MOVJ EC00004 VJ=50.00
 ARCOF
 TIMER T=4.00
 MOVL C00005 V=100.00 +MOVJ EC00005 VJ=50.00 //1-1 END
 MOVJ C00006 VJ=50.00 +MOVJ EC00006 VJ=50.00
 ARCSET ASF#(1)

```

TIMER T=0.10
MOVL C00007 V=50.00 +MOVJ EC00007 VJ=50.00 //1-2 START
ARCON ASF#(1)
MOVL C00008 V=15.0 +MOVJ EC00008 VJ=50.00
ARCOF
TIMER T=4.00
MOVL C00009 V=100.00 +MOVJ EC00009 VJ=50.00 //1-2 END
MOVJ C00010 VJ=50.00 +MOVJ EC00010 VJ=50.00
ARCSET ASF#(1)
TIMER T=0.10
MOVL C00011 V=50.00 +MOVJ EC00011 VJ=50.00 //1-3 START
ARCON ASF#(1)
MOVL C00012 V=15.0 +MOVJ EC00012 VJ=50.00
ARCOF
TIMER T=4.00
MOVL C00013 V=100.00 +MOVJ EC00013 VJ=50.00 //#####PRG 1 END
MOVJ C00014 VJ=50.00 +MOVJ EC00014 VJ=50.00
TIMER T=60.00
ARCSET ASF#(2)
TIMER T=0.10
MOVL C00015 V=50.00 +MOVJ EC00015 VJ=50.00 //#####PRG 2 START
ARCON ASF#(2)
MOVL C00016 V=15.0 +MOVJ EC00016 VJ=50.00
ARCOF
TIMER T=4.00
MOVL C00017 V=100.00 +MOVJ EC00017 VJ=50.00 //2-1 END
MOVJ C00018 VJ=50.00 +MOVJ EC00018 VJ=50.00
ARCSET ASF#(2)
TIMER T=0.10
MOVL C00019 V=50.00 +MOVJ EC00019 VJ=50.00 //2-2 START
ARCON ASF#(2)
MOVL C00020 V=15.0 +MOVJ EC00020 VJ=50.00
ARCOF
TIMER T=4.00
MOVL C00021 V=100.00 +MOVJ EC00021 VJ=50.00 //2-2 END
MOVJ C00022 VJ=50.00 +MOVJ EC00022 VJ=50.00
ARCSET ASF#(2)
TIMER T=0.10
MOVL C00023 V=50.00 +MOVJ EC00023 VJ=50.00 //2-3 START
ARCON ASF#(2)
MOVL C00024 V=15.0 +MOVJ EC00024 VJ=50.00
ARCOF
TIMER T=4.00
MOVL C00025 V=100.00 +MOVJ EC00025 VJ=50.00 //#####PRG 2 END
MOVJ C00026 VJ=50.00 +MOVJ EC00026 VJ=50.00
TIMER T=60.00
ARCSET ASF#(3)
TIMER T=0.10
MOVL C00027 V=50.00 +MOVJ EC00027 VJ=50.00 //#####PRG 3 START
ARCON ASF#(3)
MOVL C00028 V=15.0 +MOVJ EC00028 VJ=50.00
ARCOF
TIMER T=4.00
MOVL C00029 V=100.00 +MOVJ EC00029 VJ=50.00 //3-1 END
MOVJ C00030 VJ=50.00 +MOVJ EC00030 VJ=50.00
ARCSET ASF#(3)
TIMER T=0.10
MOVL C00031 V=50.00 +MOVJ EC00031 VJ=50.00 //3-2 START
ARCON ASF#(3)
MOVL C00032 V=15.0 +MOVJ EC00032 VJ=50.00

```

```

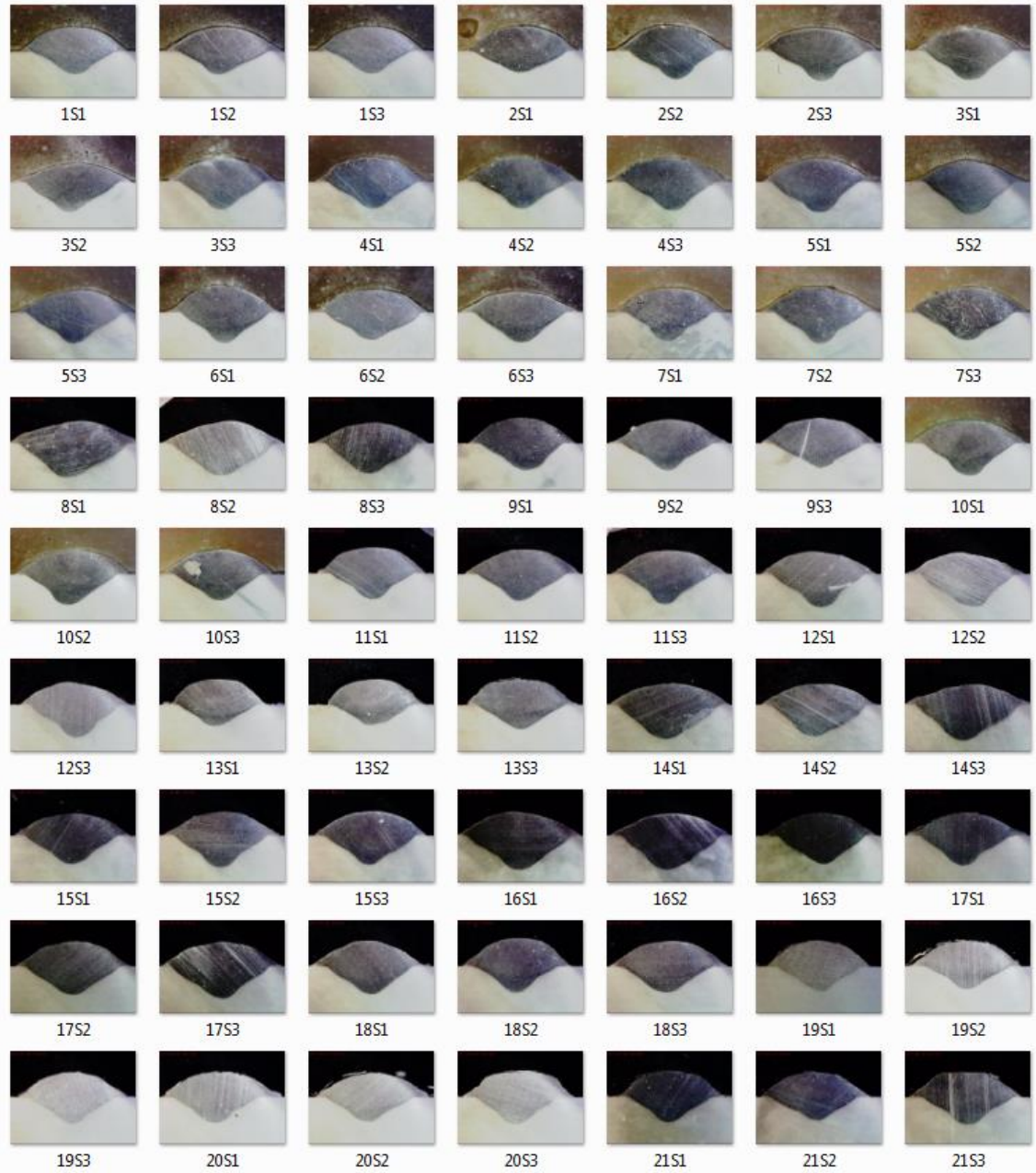
ARCOF
TIMER T=4.00
MOVL C00033 V=100.00 +MOVJ EC00033 VJ=50.00 //3-2 END
MOVJ C00034 VJ=50.00 +MOVJ EC00034 VJ=50.00
ARCSET ASF#(3)
TIMER T=0.10
MOVL C00035 V=50.00 +MOVJ EC00035 VJ=50.00 //3-3 START
ARCON ASF#(3)
MOVL C00036 V=15.0 +MOVJ EC00036 VJ=50.00
ARCOF
TIMER T=4.00
MOVL C00037 V=100.00 +MOVJ EC00037 VJ=50.00 #####PRG 3 END
MOVJ C00038 VJ=50.00 +MOVJ EC00038 VJ=50.00
TIMER T=60.00
ARCSET ASF#(4)
TIMER T=0.10
MOVL C00039 V=50.00 +MOVJ EC00039 VJ=50.00 #####PRG 4 START
ARCON ASF#(4)
MOVL C00040 V=15.0 +MOVJ EC00040 VJ=50.00
ARCOF
TIMER T=4.00
MOVL C00041 V=100.00 +MOVJ EC00041 VJ=50.00 //4-1 END
MOVJ C00042 VJ=50.00 +MOVJ EC00042 VJ=50.00
ARCSET ASF#(4)
TIMER T=0.10
MOVL C00043 V=50.00 +MOVJ EC00043 VJ=50.00 //4-2 START
ARCON ASF#(4)
MOVL C00044 V=15.0 +MOVJ EC00044 VJ=50.00
ARCOF
TIMER T=4.00
MOVL C00045 V=100.00 +MOVJ EC00045 VJ=50.00 //4-2 END
MOVJ C00046 VJ=50.00 +MOVJ EC00046 VJ=50.00
ARCSET ASF#(4)
TIMER T=0.10
MOVL C00047 V=50.00 +MOVJ EC00047 VJ=50.00 //4-3 START
ARCON ASF#(4)
MOVL C00048 V=15.0 +MOVJ EC00048 VJ=50.00
ARCOF
TIMER T=4.00
MOVL C00049 V=100.00 +MOVJ EC00049 VJ=50.00 #####PRG 4 END
MOVJ C00050 VJ=50.00 +MOVJ EC00050 VJ=50.00
TIMER T=60.00
ARCSET ASF#(5)
TIMER T=0.10
MOVL C00051 V=50.00 +MOVJ EC00051 VJ=50.00 #####PRG 5 START
ARCON ASF#(5)
MOVL C00052 V=15.0 +MOVJ EC00052 VJ=50.00
ARCOF
TIMER T=4.00
MOVL C00053 V=100.00 +MOVJ EC00053 VJ=50.00 //5-1 END
MOVJ C00054 VJ=50.00 +MOVJ EC00054 VJ=50.00
ARCSET ASF#(5)
TIMER T=0.10
MOVL C00055 V=50.00 +MOVJ EC00055 VJ=50.00 //5-2 START
ARCON ASF#(5)
MOVL C00056 V=15.0 +MOVJ EC00056 VJ=50.00
ARCOF
TIMER T=4.00
MOVL C00057 V=100.00 +MOVJ EC00057 VJ=50.00 //5-2 END
MOVJ C00058 VJ=50.00 +MOVJ EC00058 VJ=50.00

```

ARCSET ASF#(5)
TIMER T=0.10
MOVL C00059 V=50.00 +MOVJ EC00059 VJ=50.00 //5-3 START
ARCON ASF#(5)
MOVL C00060 V=15.0 +MOVJ EC00060 VJ=50.00
ARCOF
TIMER T=4.00
MOVL C00061 V=100.00 +MOVJ EC00061 VJ=50.00 #####PRG 5 END
MOVJ C00062 VJ=50.00 +MOVJ EC00062 VJ=50.00
TIMER T=60.00
ARCSET ASF#(6)
TIMER T=0.10
MOVL C00063 V=50.00 +MOVJ EC00063 VJ=50.00 #####PRG 6 START
ARCON ASF#(6)
MOVL C00064 V=15.0 +MOVJ EC00064 VJ=50.00
ARCOF
TIMER T=4.00
MOVL C00065 V=100.00 +MOVJ EC00065 VJ=50.00 //6-1 END
MOVJ C00066 VJ=50.00 +MOVJ EC00066 VJ=50.00
ARCSET ASF#(6)
TIMER T=0.10
MOVL C00067 V=50.00 +MOVJ EC00067 VJ=50.00 //6-2 START
ARCON ASF#(6)
MOVL C00068 V=15.0 +MOVJ EC00068 VJ=50.00
ARCOF
TIMER T=4.00
MOVL C00069 V=100.00 +MOVJ EC00069 VJ=50.00 //6-2 END
MOVJ C00070 VJ=50.00 +MOVJ EC00070 VJ=50.00
ARCSET ASF#(6)
TIMER T=0.10
MOVL C00071 V=50.00 +MOVJ EC00071 VJ=50.00 //6-3 START
ARCON ASF#(6)
MOVL C00072 V=15.0 +MOVJ EC00072 VJ=50.00
ARCOF
TIMER T=4.00
MOVL C00073 V=100.00 +MOVJ EC00073 VJ=50.00 #####PRG 6 END
MOVJ C00074 VJ=90.00 +MOVJ EC00074 VJ=80.00
END

ANEXO II – IMAGENS DO MICROSCÓPIO

Abaixo são apresentadas na figura 30 as imagens da avaliação macroscópica feita nos cordões soldados para as combinações de parâmetros, com três repetições cada. O código abaixo de cada figura identifica as amostras, sendo o primeiro algarismo referente a combinação de parâmetros, de 1 a 27, o segundo algarismo S, refere-se ao método MIG *Standard*, e o terceiro e último algarismo faz referência a repetição do experimento, de 1 a 3. Totalizando, são apresentados 81 cordões.



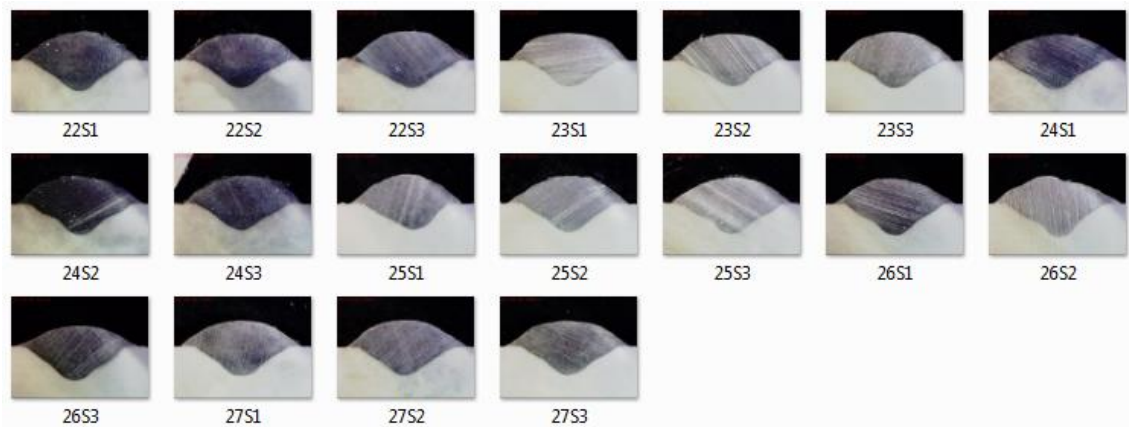


Figura 30: Macrografia das amostras MIG *Standard*

Três combinações precisaram ter fotos refeitas para o modo *Standard*, que podem ser consultadas na figura 31 devido a não ficarem por completo na imagem capturada pelo microscópio, o que impossibilitou a medição da largura. Manteve-se a nomenclatura, porém acrescentou-se a frente do código a ampliação da imagem, separada por hífen.

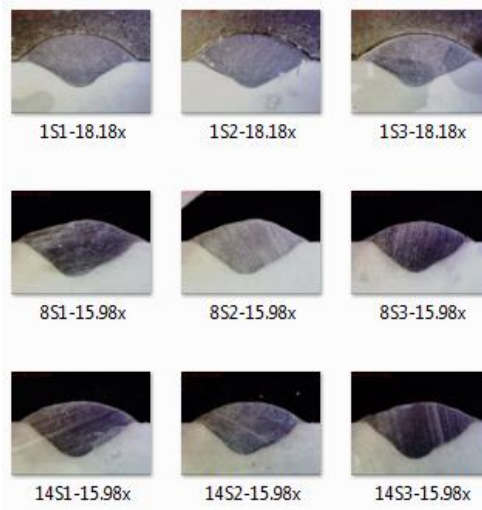


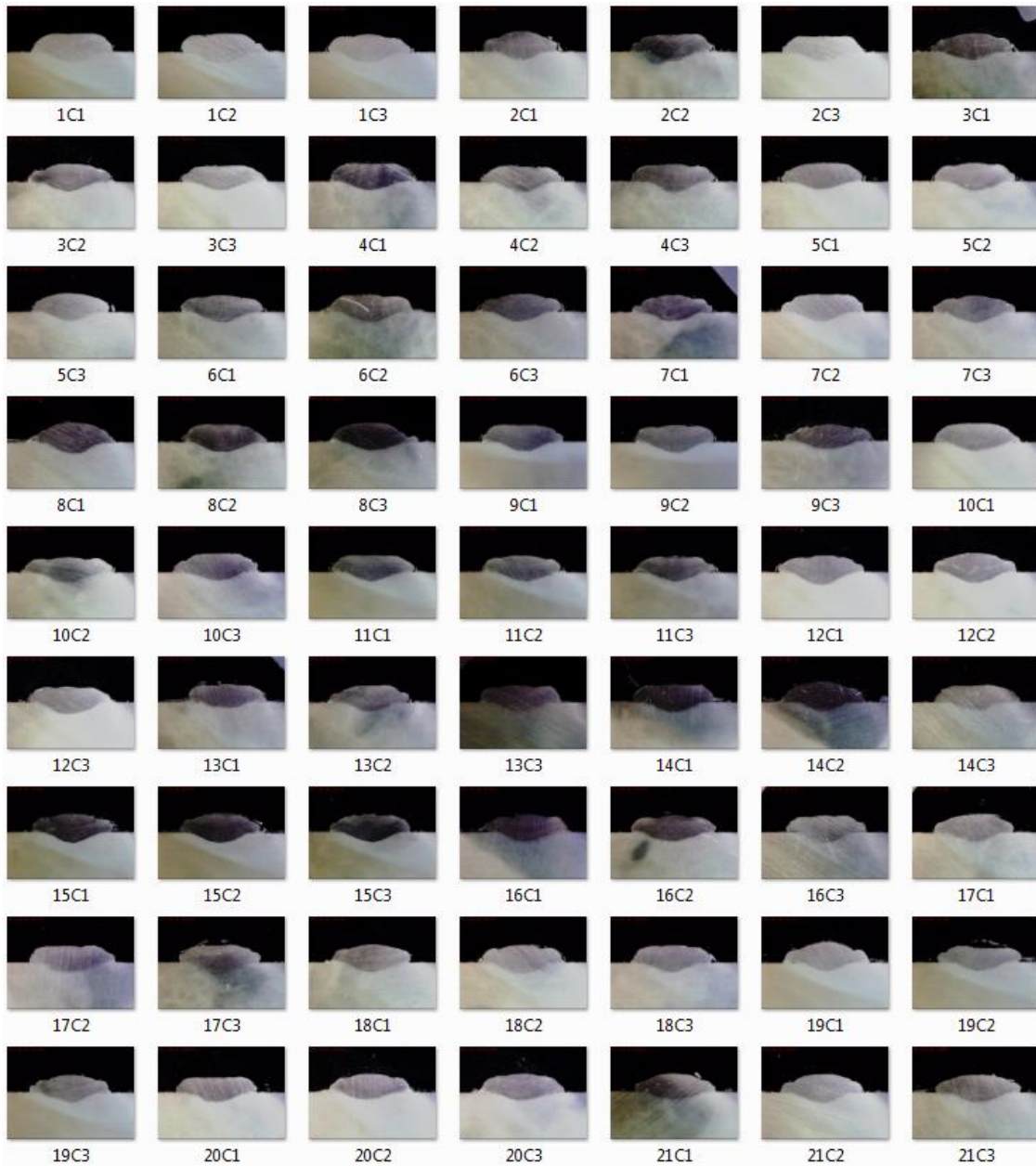
Figura 31: Imagens refeitas MIG *Standard*

São apresentadas abaixo na figura 32 as fotos tiradas pelo microscópio dos testes de confirmação realizados com a combinação de parâmetros indicada como ótima pelo método de Taguchi para largura de cordão, penetração e reforço para MIG *Standard*.



Figura 32: Testes de confirmação MIG *Standard*

Abaixo são apresentadas na figura 33 as imagens da avaliação macroscópica feita nos cordões soldados para as combinações de parâmetros, com três repetições cada. O código abaixo de cada figura identifica as amostras, sendo o primeiro algarismo referente a combinação de parâmetros, de 1 a 27, o segundo algarismo C, refere-se ao método MIG CMT Pulsado, e o terceiro e último algarismo faz referência a repetição do experimento, de 1 a 3. Totalizando, são apresentados 81 cordões.



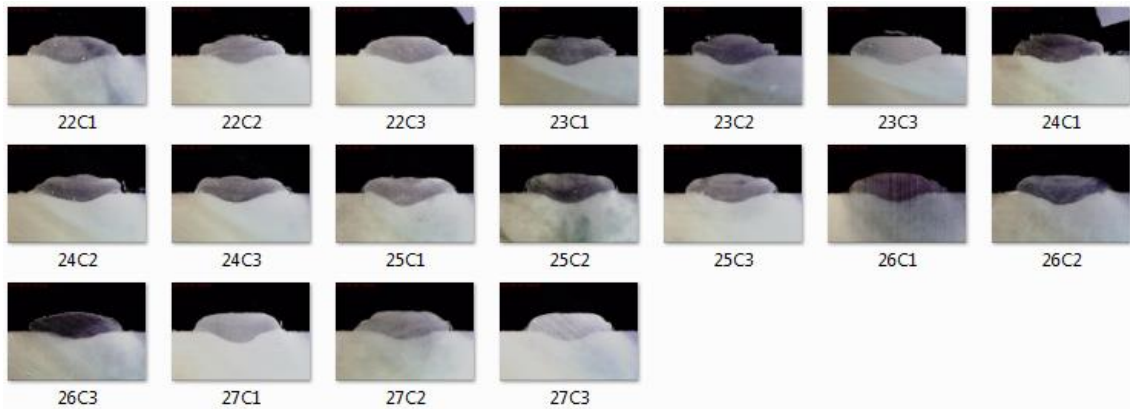


Figura 33: Macrografia das amostras MIG CMT Pulsado

São apresentadas abaixo na figura 34 as fotos tiradas pelo microscópio dos testes de confirmação realizados com a combinação de parâmetros indicada como ótima pelo método de Taguchi para largura de cordão, penetração e reforço para MIG CMT Pulsado.



Figura 34: Testes de confirmação MIG CMT Pulsado