



UNIVERSIDADE FEDERAL DE PERNAMBUCO  
CENTRO DE TECNOLOGIA E GEOCIÊNCIAS  
PROGRAMA DE GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA MECÂNICA

PETRÔNIO LUÍZ CABRAL DE CARVALHO CLEMENTE FERNANDES

**AVALIAÇÃO DA RESPOSTA PARAMÉTRICA NA MANUFATURA ADITIVA POR  
DEPOSIÇÃO AO ARCO ELÉTRICO UTILIZANDO O PROCESSO GMAW  
PULSADO SINÉRGICO**

Recife  
2023

PETRÔNIO LUÍZ CABRAL DE CARVALHO CLEMENTE FERNANDES

**AVALIAÇÃO DA RESPOSTA PARAMÉTRICA NA MANUFATURA ADITIVA POR  
DEPOSIÇÃO AO ARCO ELÉTRICO UTILIZANDO O PROCESSO GMAW  
PULSADO SINÉRGICO**

Trabalho de Conclusão de Curso apresentado ao Programa de Graduação em Engenharia Mecânica da Universidade Federal de Pernambuco, como requisito parcial para obtenção do título de bacharel em Engenharia Mecânica. Área de concentração: Correspondente ao indicado na ata de defesa

Orientador: Tiago Felipe de Abreu Santos

Coorientador: Guilherme Gadelha de Sousa Figueiredo

Coorientador: Ivan Bezerra de Mello Picchi

Recife

2023

Ficha de identificação da obra elaborada pelo autor,  
através do programa de geração automática do  
SIB/UFPE

Fernandes, Petrônio Luíz Cabral de Carvalho Clemente .  
AVALIAÇÃO DA RESPOSTA PARAMÉTRICA NA MANUFATURA  
ADITIVA POR DEPOSIÇÃO AO ARCO ELÉTRICO UTILIZANDO O  
PROCESSO GMAW PULSADO SINÉRGICO / Petrônio Luíz Cabral de Carvalho  
Clemente Fernandes. - Recife, 2023.  
83 : il., tab.

Orientador(a): Tiago Felipe de Abreu Santos  
Coorientador(a): Guilherme Gadelha de Sousa Figueiredo  
Coorientador(a): Ivan Bezerra de Mello Picchi  
Trabalho de Conclusão de Curso (Graduação) - Universidade Federal de  
Pernambuco, Centro de Tecnologia e Geociências, Engenharia Mecânica -  
Bacharelado, 2023.

1. Manufatura Aditiva. 2. GMAW-Pulsado. 3. Aço Inoxidável. 4.  
Planejamento de Experimentos. 5. Parâmetros de Soldagem. I. Santos, Tiago  
Felipe de Abreu . (Orientação). II. Figueiredo, Guilherme Gadelha de Sousa.  
(Coorientação). III. Picchi, Ivan Bezerra de Mello. (Coorientação). Título.



**Universidade Federal de Pernambuco  
Departamento de Engenharia Mecânica Centro de  
Tecnologia e Geociências- CTG/EEP**



**ATA DE SESSÃO DE DEFESA DE  
TRABALHO DE CONCLUSÃO DE CURSO – TCC2**

Ao 27º dia do mês de abril do ano de dois mil e vinte e três, às 15:00 horas, de forma virtual através da plataforma google meet, reuniu-se a banca examinadora para a sessão pública de defesa do Trabalho de Conclusão de Curso em Engenharia Mecânica da Universidade Federal de Pernambuco, intitulado **Avaliação da resposta paramétrica na manufatura aditiva por deposição ao arco elétrico utilizando o processo GMAW pulsado sinérgico**, elaborado pelo aluno **Petrônio Luíz Cabral de Carvalho Clemente Fernandes**, matrícula 112.555.864/43, composta pelos avaliadores Prof. **Tiago Felipe de Abreu Santos** (orientador), Me. **Guilherme Gadelha de Sousa Figueiredo** (Coorientador), Prof. **Justo Emílio Alvarez Jácomo** (avaliador) e Profa. **Nathalia Bezerra de Lima** (avaliadora). Após a exposição oral do trabalho, o candidato foi arguido pelos componentes da banca que em seguida reuniram-se e deliberaram pela sua \_\_\_\_\_, atribuindo-lhe a média \_\_\_\_\_, julgando-o apto( ) / inapto( ) à conclusão do curso de Engenharia Mecânica. Para constar, redigi a presente ata aprovada por todos os presentes, que vai assinada pelos membros da banca.

Orientador: Prof. Tiago Felipe de Abreu Santos Nota:  
Assinatura \_\_\_\_\_

Coorientador: Me. Guilherme Gadelha de Sousa Figueiredo Nota:  
Assinatura \_\_\_\_\_

Avaliador Interno: Prof. Justo Emílio Alvarez Jácomo Nota:  
Assinatura \_\_\_\_\_

Avaliadora Externa: Profa. Nathalia Bezerra de Lima Nota:  
Assinatura \_\_\_\_\_

Recife, 27 de abril de 2023.

Prof. Marcus Costa de Araújo  
Coordenador de Trabalho de Conclusão de curso - TCC  
Curso de Graduação em Engenharia Mecânica – CTG/EEP-UFPE

Dedico este trabalho para meus pais, como prova do agradecimento pelo apoio e a confiança depositada em mim em todos esses anos.

## **AGRADECIMENTOS**

Todo o reconhecimento ao grupo de pesquisa Soldamat, liderado pelo professor Tiago Felipe de Abreu Santos, que me possibilitou todos os recursos e suporte para a realização deste trabalho. Gratular também o apoio dado pelos meus coorientadores o Guilherme Gadelha de Sousa Figueiredo e o Ivan Bezerra de Melo Picchi por me fornecer todo conhecimento necessário para realização deste trabalho. Agradeço também às instituições de fomento por apoiarem a pesquisa e a ciência em nosso estado, tornando possíveis a realização de trabalhos como este. Também registro meu agradecimento aos professores que aceitaram fazer parte da banca e contribuíram para o aprimoramento da pesquisa e do discente. Devo prestar o reconhecimento a própria Universidade Federal de Pernambuco (UFPE) por ter me dado a possibilidade de crescer como profissional e como ser humano. Por fim, devo agradecer ao Instituto Nacional de Revestimento e Tecnologia de Materiais (INTM) por disponibilizar toda sua estrutura para realização da pesquisa.

## RESUMO

Os processos de fabricação vêm continuamente sendo aprimorados nos mais variados setores industriais. Atualmente, o setor de usinagem ainda corresponde a uma parcela significativa dos processos de fabricação do setor metal mecânico, gerando um desperdício elevado de material na forma de cavaco e possuindo grande limitação para produzir peças de geometria complexa. A manufatura aditiva a arco elétrico, processo que é amplamente pesquisado e, vem se mostrando como uma nova forma de produzir peças com elevada complexidade geométrica e menor desperdício de material, utilizando os recursos de maneira mais sustentável. Utilizando-se do processo de soldagem GMAW Pulsado e arame eletrodo de aço inoxidável ER309L-Si controlado por um braço robótico, realizou-se um planejamento de experimentos para estudar a influência que a velocidade de soldagem, a velocidade de alimentação e a tensão exerceriam no processo de manufatura aditiva por deposição a arco. Constatou-se que a tensão é fator dominante no nível de respingos, que a velocidade de alimentação exerce forte influência no aporte térmico devido ao controle sinérgico da fonte, e a velocidade de soldagem é um importante fator para se controlar a geometria da deposição metálica. Por fim, observou-se que os parâmetros que resultaram em maiores aportes energéticos redundaram em menores teores de ferrita médios e, conseqüentemente, menores níveis de dureza.

**Palavras-chave:** Manufatura Aditiva; GMAW-Pulsado; Aço Inoxidável; Planejamento de Experimentos; Parâmetros de Soldagem.

## **ABSTRACT**

Manufacturing processes are continually being improved in the most varied sectors. Currently, the machining sector still corresponds to a significant portion of the manufacturing processes in the metalworking sector and machining generates a very high waste of material in the form of chips and has a great capacity to produce parts with complex geometry. Electric arc additive manufacturing, a process that is currently being widely researched and developed, has been proving to be a new way of producing parts with high complexity, low cost and minimal waste of material. Using the pulsed GMAW contraction process and ER309L-Si stainless steel electrode wire controlled by a robotic arm, an experiment was planned to study the influence that the acceleration speed, the feed speed and the voltage would have on in the additive manufacturing process by arc deposition. It was found that the voltage is the dominant factor in the spatter level, that the feeding speed exerts a strong influence on the thermal input due to the synergic control and the flow speed is an important factor to control the geometry of the metallic deposition. Finally, it was observed that parameters that would result in higher energy inputs would result in lower average ferrite numbers and, consequently, lower hardness levels.

**Keywords:** Additive Manufacturing; GMAW-Pulsed; Stainless Steel; Design of Experiments; Welding parameterization.

## SUMÁRIO

<b>1 INTRODUÇÃO .....</b>	<b>1</b>
<b>2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA .....</b>	<b>5</b>
2.1 MANUFATURA ADITIVA DE LIGAS METÁLICAS .....	5
2.2 COMPONENTES FABRICADOS POR MANUFATURA ADITIVA DE DEPOSIÇÃO A ARCO .....	7
2.3 MANUFATURA ADITIVA VIA GMAW PULSADO .....	9
<b>3 FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA .....</b>	<b>11</b>
3.1 PROCESSOS GMAW COM CONTROLE DE TRANSFERÊNCIA METÁLICA .....	11
3.1.1 Transferência arco spray pulsado (GMAW-P) .....	11
3.1.2 Análise dos parâmetros de transferência metálica GMAW-P .....	12
3.1.3 Fontes de soldagem GMAW pulsado .....	14
3.1.4 Soldagem GMAW pulsado sinérgico .....	15
3.2 PLANEJAMENTO DE EXPERIMENTOS FATORIAL .....	16
<b>4 OBJETIVOS .....</b>	<b>18</b>
4.1 GERAL .....	18
4.2 ESPECÍFICOS .....	18
<b>5 METODOLOGIA .....</b>	<b>19</b>
5.1 CONSUMÍVEIS .....	19
5.2 EQUIPAMENTOS UTILIZADOS NA MANUFATURA ADITIVA .....	20
5.3 DEFINIÇÃO DOS NÍVEIS DE CADA FATOR .....	21
5.4 PLANEJAMENTO DE EXPERIMENTOS .....	25
5.5 EXECUÇÃO DOS EXPERIMENTOS .....	26
5.6 MENSURAÇÃO DO NÍVEL DE RESPINGOS .....	28
5.7 MENSURAÇÃO DA ALTURA E LARGURA .....	28
5.8 CORTES PARA SEPARAÇÃO DE CADA CONDIÇÃO DO DOE .....	29
5.9 ENSAIO DE LÍQUIDO PENETRANTE (LP) .....	31
5.10 REMOÇÃO DE PORÇÃO CENTRAL DE CADA EXPERIMENTO .....	32
5.11 PREPARAÇÃO DAS AMOSTRAS PARA O ENSAIO DE DUREZA E AQUISIÇÃO DO NÚMERO DE FERRITA .....	33
5.12 AQUISIÇÃO DO NÚMERO DE FERRITA (NF) .....	35
5.13 ENSAIO DE DUREZA ROCKWELL .....	37
<b>6 RESULTADOS E DISCUSSÕES .....</b>	<b>39</b>
6.1 ENSAIO DE LÍQUIDO PENETRANTE .....	39

<b>6.2 INFLUÊNCIA DOS FATORES NO NÍVEL DE RESPINGOS .....</b>	<b>40</b>
<b>6.3 INFLUÊNCIA DOS FATORES NA GEOMETRIA DA DEPOSIÇÃO .....</b>	<b>44</b>
<b>6.3.1 Influência dos fatores na altura média .....</b>	<b>45</b>
<b>6.3.2 Influência dos fatores na largura média .....</b>	<b>47</b>
<b>6.3.3 Estudo isolado da influência da velocidade de soldagem na geometria .....</b>	<b>49</b>
<b>6.4 INFLUÊNCIA DOS FATORES NO NÚMERO DE FERRITA (NF) .....</b>	<b>52</b>
<b>6.5 INFLUÊNCIA DOS FATORES NA DUREZA MÉDIA .....</b>	<b>58</b>
<b>7 CONCLUSÕES .....</b>	<b>65</b>
<b>8 PERSPECTIVAS E TRABALHOS FUTUROS .....</b>	<b>66</b>
<b>REFERÊNCIAS .....</b>	<b>67</b>

## LISTA DE FIGURAS

Figura 1 – Esquema ilustrativo da MADA .....	2
Figura 2 – MADA sendo executada na prática .....	3
Figura 3 – Tipos de MA de ligas metálicas: a) DED-GMA; b) DED-Laser (DED-L) ou DED-Feixe de Elétrons (DED-FE); e c) PBF – Laser (PBF-L) ou PBF – Feixe de Elétrons (PBF-FE) .....	6
Figura 4 – Componentes fabricados por MADA: a) hélice náuticas; b) recuperação das pás de turbina Pelton .....	8
Figura 5 – Distribuição de calor: (a) soldagem; (b) MADA .....	9
Figura 6 – Fluxograma de trabalho .....	19
Figura 7 – Visão geral de todos os equipamentos envolvidos na MADA do presente trabalho .....	20
Figura 8 – Painel de seleção dos parâmetros de transferência metálica .....	21
Figura 9 – Paredes de aço ER309LSi fabricados por MA com parâmetros listados na Tabela 4 .....	23
Figura 10 – Paredes de aço ER 309LSi fabricados por MADA com parâmetros listados na Tabela 5 .....	24
Figura 11 – Sequência de experimentos aleatorizados gerados pelo Minitab .....	26
Figura 12 – Preparando o substrato para execução dos experimentos .....	27
Figura 13 – Execução dos primeiros 16 experimentos .....	27
Figura 14 – Pontos de medição de cada experimento .....	29
Figura 15 – Separação de cada condição experimental do substrato .....	30
Figura 16 – Experimentos do planejamento fatorial 2 <sup>3</sup> separados e catalogados .....	30
Figura 17 – Ensaio LP sendo realizado .....	31
Figura 18 – Exemplo de remoção de porção central de cada condição .....	32
Figura 19 – Equipamentos para auxiliar na preparação das superfícies: (a) Embutidora; (b) suporte rotativo para lixamento/polimento .....	33
Figura 20 – (a) croqui das regiões de medição; (b) execução do ensaio realizado pelo autor .....	35
Figura 21 – Ensaio de dureza: (a) visão geral do durômetro; (b) visão próxima da amostra sendo ensaiada .....	37
Figura 22 – Resultado do LP: visão lateral direita .....	39
Figura 23 – Resultado do LP: visão lateral esquerda .....	40
Figura 24 – Gráfico de Pareto da influência de cada fator e suas interações no nível de respingo .....	41
Figura 25 – Gráfico do efeito individual de cada fator em relação ao nível de respingos .....	42
Figura 26 – Tensão afetando o nível de respingos: (a) 27V, 4m/min; (b) 23V, 4m/min .....	43
Figura 27 – Gráfico de contorno do nível de respingos em relação a VAL (m/min) e U (V) .....	44
Figura 28 – Gráfico de Pareto da influência dos fatores e suas interações na altura média .....	45
Figura 29 – Gráfico do efeito individual de cada fator em relação à altura média .....	46
Figura 30 – Gráfico de Pareto da influência dos fatores e suas interações na largura média .....	47
Figura 31 – Gráfico do efeito individual de cada fator em relação a largura média .....	48
Figura 32 – Gráfico da Velocidade de Soldagem (cm/min) x Altura Média (mm) .....	50
Figura 33 – Gráfico da Velocidade de Soldagem x Largura Média .....	51
Figura 34 – Modo de solidificação x Comprimento total de trinca .....	53

Figura 35 – Diagrama WRC - 1992 com marcações dos limites da solidificação FA .....	53
Figura 36 – Gráfico de Pareto da influência dos fatores e suas interações no NF médio .....	54
Figura 37 – Gráfico de efeito individual de cada fator em relação ao NF .....	54
Figura 38 – Gráfico do efeito da interação de VS (cm/min) e U (V) no NF médio .....	55
Figura 39 – Gráfico de contorno NF médio em relação a VAL (m/min) e U (V).....	56
Figura 40 – NF médio x Energia imposta em quilojoule por milímetro .....	56
Figura 41 – Gráfico de Pareto influência dos fatores e suas interações na dureza média .....	58
Figura 42 – Gráfico de efeito individual de cada fator em relação a dureza média (HRB) .....	59
Figura 43 – Gráfico de efeito da interação entre os efeitos em relação a dureza média .....	60
Figura 44 – Gráfico de contorno da dureza média em relação a VAL e U .....	61
Figura 45 – Gráfico da dureza média (HRB) x Energia imposta em quilojoule por milímetro .....	62
Figura 46 – Gráfico de contorno da dureza média em relação ao NF e a energia em quilojoule por milímetro .....	62

## LISTA DE TABELAS

Tabela 1 – Composição química do aço utilizado na MADA .....	19
Tabela 2 – Determinação da velocidade de alimentação pela Equação 2 .....	22
Tabela 3 – Parâmetros de blocagem .....	22
Tabela 4 – Tabela de experimentos para validação dos valores de Tensão e Velocidade de Alimentação .....	22
Tabela 5 – Experimentos apenas variando a velocidade de soldagem (deslocamento da tocha) .....	24
Tabela 6 – DOE 3 fatores, 2 Níveis mais ponto central .....	25
Tabela 7 – Critério de análise do nível de respingos .....	28
Tabela 8 – Amostras embutidas de cada condição utilizadas no ensaio de dureza e medição do número de ferrita .....	34
Tabela 9 – NF médio medido de cada condição .....	35
Tabela 10 – Durezas médias HRB .....	38
Tabela 11 – Resumo da influência dos fatores no nível de respingos .....	44
Tabela 12 – Resumo da influência dos fatores na altura .....	52
Tabela 13 – Resumo da influência dos fatores na largura .....	52
Tabela 14 – Resumo da influência dos fatores no Número de Ferrita (NF) .....	58
Tabela 15 – Resumo da influência dos fatores na dureza .....	64

## 1 INTRODUÇÃO

Hodiernamente, a manufatura aditiva (MA) está em evidência no setor industrial e acadêmico. Após o avanço das tecnologias de transferência metálica utilizados na soldagem, observou-se a possibilidade de se utilizar mecanismos automáticos de trajetória (braços robóticos e mesas cartesianas) e sistemas de controle de transferência metálica para viabilizar a manufatura tridimensional de componentes metálicos. A principal motivação do desenvolvimento dessa tecnologia é a possibilidade de fabricação de peças com elevada complexidade geométrica, grandes dimensões, elevada densidade e o baixo desperdício de matéria-prima quando comparado com processos convencionais de manufatura subtrativa (WESLING *et al*, 2021). Outro ponto de destaque da manufatura aditiva, é que ela confere maior liberdade ao projetista mecânico, uma vez que ele pode utilizar a MA como um processo único, ou pode utilizar em conjunto com outros processos de fabricação (GALJAARD *et al*, 2014).

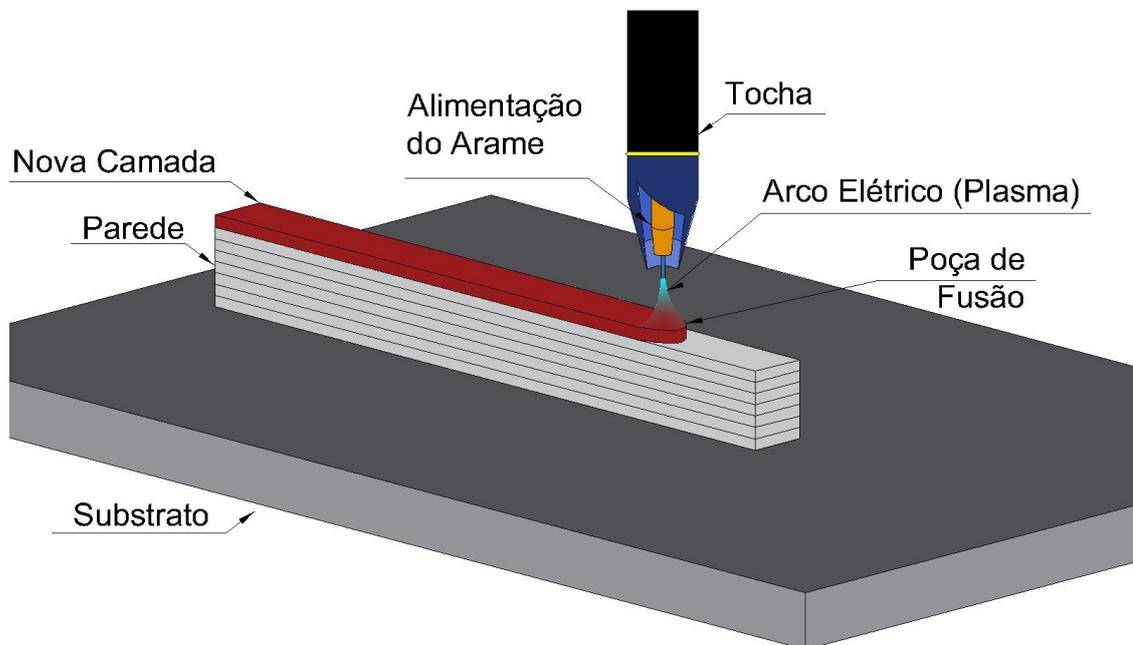
A manufatura aditiva para metais está dividida em três grandes classes, são elas: *Powder Bed*, *Powder Feed* e *Wire Feed*. O *Powder Bed* envolve o depósito de uma camada de pó metálico que é fundido localmente por um feixe de energia para criar a peça desejada. No *Powder Feed*, um fluxo contínuo de pó metálico é fundido e depositado em camadas. Por fim, o processo *Wire Feed* consiste em alimentar continuamente um fio metálico e fundir através de um arco elétrico para criar a peça desejada (DEBROY *et al.*, 2018). Dentre os tipos existentes, será utilizado, no presente estudo, a classe de deposição metálica a arco elétrico. O GMAW (*Gas Metal Arc Welding*) compreende o tipo *Wire Feed*, ele foi o processo escolhido para deposição das camadas de metal. O GMAW viabiliza uma deposição controlada através de seus controles dinâmicos de transferência metálica (SCOTI e PONOMAREV, 2014).

A utilização do processo GMAW para manufatura aditiva por deposição ao arco (MADA), só se tornou uma possibilidade devido ao avanço dos controles de trajetória dos mecanismos robóticos adaptados para esse fim. Porém, devido à complexidade paramétrica que envolve o processo de soldagem a arco, se faz necessário verificar como os parâmetros que envolvem o processo, influenciam na forma e na qualidade da deposição metálica de cada camada. Só com esse tipo de

conhecimento será possível estabelecer a previsibilidade e o controle na fabricação de componentes utilizando MADA (DEBROY, 2018).

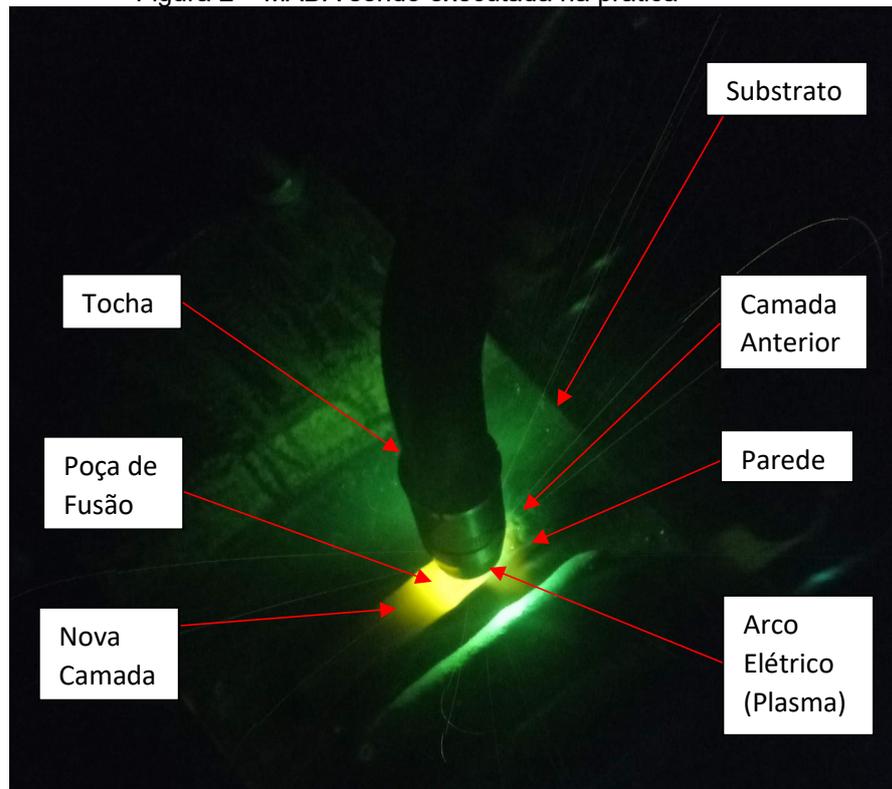
Toda concepção de peças está vinculada aos processos de fabricação que são capazes de conceber tal componente. As máquinas de usinagem são limitadas quanto a geometria e o tamanho do componente por elas fabricados. Mesmo que haja a possibilidade de alteração do tipo de peça fabricada, há a necessidade de mudanças de ferramentas, matrizes, capacidade da máquina e etc. Além disso, cada detalhe que seja adicionado na fabricação de uma peça, implica em elevada complexidade operacional (DINIZ *et al*, 2014). A MADA supera grande parcela da dificuldade encontrada na usinagem, pois basta mudar a programação de trajetória do equipamento para que uma peça totalmente diferente possa ser fabricada. Somado a isso, o tamanho do componente fabricado por MADA é limitado apenas pelo raio de ação do mecanismo que controla a deposição. Isso possibilita construção de peças imensas, como pontes, pás de turbinas de hidroelétricas, hélices de navios e etc. A Figura 1 mostra um esquema de como é realizado o processo MADA e na Figura 2 é mostrado o processo ocorrendo experimentalmente.

Figura 1 – Esquema ilustrativo da MADA



Fonte: Autor (2023)

Figura 2 – MADA sendo executada na prática



Fonte: Autor (2023)

Como já mencionado anteriormente, o processo envolve baixo desperdício de material, uma vez que as peças produzidas por MADA são *near-net-shape*, ou seja, próximas das suas formas finais. Então, as perdas são derivadas dos respingos produzidos durante a deposição metálica e proveniente de usinagem para acabamento e ajuste dimensional.

O desenvolvimento da MADA trará resultados impactantes para a engenharia, uma vez que possibilitará o barateamento da produção de componentes complexos, feitos com materiais de baixa usinabilidade e que outrora eram inviáveis de se fabricar com as técnicas convencionais de fabricação. Outra grande inovação será a criação de componentes com diversas ligas metálicas diferentes ao longo de sua estrutura, possibilitando assim componentes com propriedades mecânicas e metalúrgicas únicas (REIMANN *et al*, 2021). Outra grande potencialidade da impressão 3D utilizando o braço robótico, é o número de superior de eixos de movimentação em relação as mesas cartesianas, que se movimentam em apenas 3 eixos. Isso permite que a direção das camadas depositadas possa adquirir a mesma direção dos esforços que o componente será submetido, isso possibilita um grande aumento de propriedade mecânica do material. Uma vez que tracionar

longitudinalmente as camadas, na direção da deposição, deforma muito menos do que tracionar, utilizando o mesmo módulo de força, perpendicularmente em relação à direção das camadas (BEER *et al*, 2013).

Deste modo, um novo horizonte de pesquisa é criado, pois os campos de estudo vastamente explorados e conhecidos da soldagem e da ciência de materiais, devem ser revisitados e estudados a luz desse novo processo.

O presente trabalho analisará como os parâmetros de soldagem do processo GMAW-Pulsado influenciam na geometria, dureza, nível de respingos e teor de ferrita nos depósitos metálicos da MADA. Para isso, será realizado um planejamento de experimentos (*Design of Experiments*) fatorial  $2^3$  para verificar a reposta que a Tensão (U), a Velocidade de Alimentação (VAL) e a Velocidade de Soldagem (VS) exercem sobre todos os itens estudados nessa pesquisa. Com os dados obtidos do planejamento experimental é possível antever, baseado nos modelos de regressão gerados, quais serão as respostas que determinada condição irá gerar. Com isso, pode-se estimar, com elevada margem de confiança, qual será a geometria que cada camada possuirá, bem como qualquer outra resposta que esteja acoplada aos dados do planejamento experimental (NETO, SCARMINIO, BRUNS, 2010).

## 2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

Nesta seção, apresentam-se alguns dos tópicos trabalhados no processo de manufatura aditiva de ligas metálicas, com enfoque na aplicação desse tipo de técnica utilizando processo GMAW-Pulsado. Adicionalmente, mostra-se como essa aplicação é utilizada em componentes de grandes dimensões de diversos setores da indústria metalmeccânica.

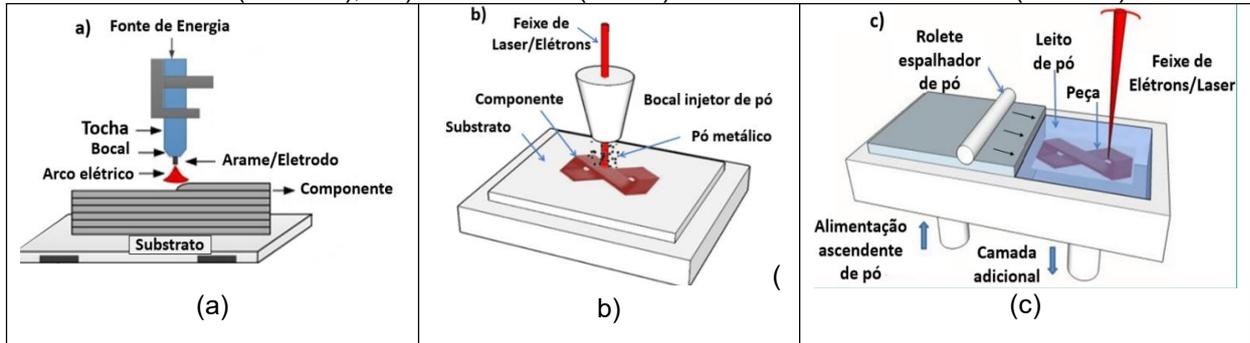
### 2.1 MANUFATURA ADITIVA DE LIGAS METÁLICAS

De acordo com a ISO/ASTM52900 (2021), a MA é um processo de fabricação de componentes através da sobreposição de camadas de certos materiais. Os processos de MA permitem a fabricação de componentes com complexidade topológica e geométrica, dispensando qualquer tipo de ferramental específico para o tipo de peça que se queira produzir. A MA começou a ser amplamente implementada na década de 80. Nessa época, a fabricação era realizada com resinas poliméricas fotocuráveis com o objetivo de realizar prototipagem rápida e obter componentes pequenos (DEBROY *et al.*, 2018).

Atualmente, os processos de MA detêm o potencial de produzir partes de componentes ou peças inteiras com grandes dimensões, utilizando ligas metálicas. A MA é amplamente difundida em setores como a indústria naval, automotiva, biomédica, aeroespacial, militar e aeronáutica (VORA *et al.*, 2022). A adequada utilização da MA de ligas metálicas tem a capacidade de produzir peças com baixo desperdício de material, reduzindo os níveis de estoque de insumos e, conseqüentemente, permitindo a diminuição significativa dos custos de fabricação (VORA *et al.*, 2022).

Os processos de manufatura aditiva de ligas metálicas são divididos de acordo com a ISO/ASTM: 52900 (2021) em duas categorias: MA por Deposição por Energia Direcionada - “*Directed Energy Deposition*” (DED), e MA por fusão de leito de pó - “*Powder Bed Fusion*” (PBF). A Figura 3 ilustra essas duas categorias de MA.

Figura 3 – Tipos de MA de ligas metálicas: a) DED-GMA; b) DED-Laser (DED-L) ou DED-Feixe de Elétrons (DED-FE); e c) PBF – Laser (PBF-L) ou PBF – Feixe de Elétrons (PBF-FE)



Fonte: Adaptado de DebRoy et al (2018)

Os processos de MA de ligas metálicas da classe DED, utilizam arame eletrodo ou pó metálico como matéria a ser fundida, através de calor proveniente de arco elétrico na Manufatura Aditiva por Deposição a Arco (MADA) e do calor proveniente da luz do laser (DED-L e PBF-L). No processo PBF-L, a camada de pó é inteiramente posicionada pelo rolete espalhador e logo em seguida é feita a fusão da camada para sua consolidação. Na MADA e DED-L, à medida que o material de adição vai sendo fornecido, é aplicada energia para fusão daquela porção de material.

É importante destacar que os processos que utilizam laser (DED-L e PBF-L) possuem resolução da peça impressa muito superior à MADA. Esse fato é devido ao tamanho diminuto das partículas de pó metálico e do diâmetro do feixe de luz (DEBROY *et al.*, 2018). Porém, essa forma de MA possui taxa de fusão muito baixa, elevando o tempo de impressão de forma considerável. Outra limitação dessa forma de MA é relacionada à baixa capacidade dos reservatórios de pó dos equipamentos e seu elevado custo, uma vez que a obtenção do pó é onerosa em comparação aos arames metálicos (TANG *et al.*, 2015; DEBROY *et al.*, 2018; PINTO *et al.*, 2020).

Em contrapartida, os processos MADA permitem uma elevada taxa de deposição em comparação aos outros tipos de MA de ligas metálicas. Os processos MADA são recomendados para componentes com peso maior que 10 quilogramas e de dimensões superiores às fabricadas utilizando pó metálico (DED-L e PBF-L) (WILLIAMS *et al.*, 2016).

A grande desvantagem da utilização da MADA reside no fato de que se faz necessário uma usinagem de acabamento para que se tenha uma superfície menos rugosa e com características geométricas de acordo com as especificações de

projeto. Quando comparadas aos processos que utilizam laser e feixe de elétrons, essas desvantagens são aceitáveis em função do baixo custo dos implementos e dos equipamentos necessários nesse processo. A fonte, o controle de trajetória (robôs de soldagem comuns de indústrias, por exemplo), a quantidade de gás de proteção necessário e a bobina de arame eletrodo, são expressivamente menos custosos que os equipamentos necessários para os processos a laser (HADEN *et al.*, 2017). O termo MADA contempla todos os processos de MA de ligas metálicas que utilizam arco elétrico. Então, são utilizados alguns tipos de fontes de soldagem para MADA. Tendo isto elencado, os processos de soldagem que são utilizados na MADA são: o *Metal Inertial Gas* (MIG) GMAW, o *Gas Tungsten Arc* (GTAW) e o *Plasma Arc Welding* (PAW).

Segundo Willians *et al* (2016), a MADA utilizando GMAW é a opção mais utilizada. Isso deve-se pela própria característica desse tipo de processo, uma vez que possuem diversos tipos de controle de transferência metálica, alimentação de arame automático e alta capacidade das bobinas de arame eletrodo. Assim sendo, a MADA utilizando GMAW apresenta-se como uma substituta ou aliada viável das formas convencionais de fabricação de componentes. O conhecimento amplamente estudado no ramo da soldagem a arco serve de forte alicerce teórico para as novas pesquisas no ramo da MADA (OLIVEIRA, SANTOS e MIRANDA, 2020).

## 2.2 COMPONENTES FABRICADOS POR MANUFATURA ADITIVA DE DEPOSIÇÃO A ARCO

Na indústria naval, existe uma gama de componentes metálicos com geometrias complexas e de elevadas dimensões. A MADA insere-se, nesse contexto, para fornecer rotas de fabricação mais eficientes, de menor custo e mais sustentáveis. Essa indústria, por possuir componentes de grandes dimensões, utilizam, por exemplo, o processo de fundição para manufaturar suas peças. Esse processo envolve grande complexidade para se conseguir uma fundição isenta de defeitos e dentro das especificações de projeto. Somado a isso, têm-se o alto custo envolvido no processo de fundição e, por conseguinte, os custos agregados ao transporte dos componentes fabricados. A MADA, porém, tem ampla capacidade de fabricar esses componentes náuticos com menor custo operacional, viabilizando a

fabricação tanto nos estaleiros quanto dentro da própria embarcação, diminuindo consideravelmente os custos de transporte e movimentação de carga.

Os materiais mais utilizados na fabricação de componentes náuticos são cobre, titânio, níquel alumínio e ligas ferrosas como os aços inoxidáveis (QUEGUINEUR *et al.*, 2018; TAŞDEMIR e NOHUT, 2021). Os aços inoxidáveis são amplamente utilizados na produção de hélices, turbinas e propulsores navais. Para demonstrar a potencialidade da MADA via GMAW, na Figura 4 (a) está a primeira hélice de um propulsor de embarcação fabricada por manufatura aditiva a arco utilizando GMAW; esse componente foi feito pelo RAMLAB® (*Rotterdam Additive Manufacturing Lab*) em parceria com a Autodesk®, Damen® e Bureau Veritas®. Na Figura 4 (b), contém a imagem de uma recuperação das hélices de uma turbina Pelton da Hidrelétrica de Bieudron Suíça. A parte recuperada das pás foram feitas de aço AISI 415.

Figura 4 – Componentes fabricados por MADA: a) hélice náuticas; b) recuperação das pás de turbina Pelton



Fonte: Adaptado de Feldmann *et al* (2019) e Appleyard (2012)

A utilização dos aços inoxidáveis via MADA em componentes navais de grandes dimensões são tratados nos trabalhos de Quigineur *et al* (2018) e Cunningham *et al* (2018). Contudo, não é explorado nestes trabalhos a utilização do GMAW-Pulsado (GMAW-P). Os autores preferiram utilizar o GMAW tradicional em

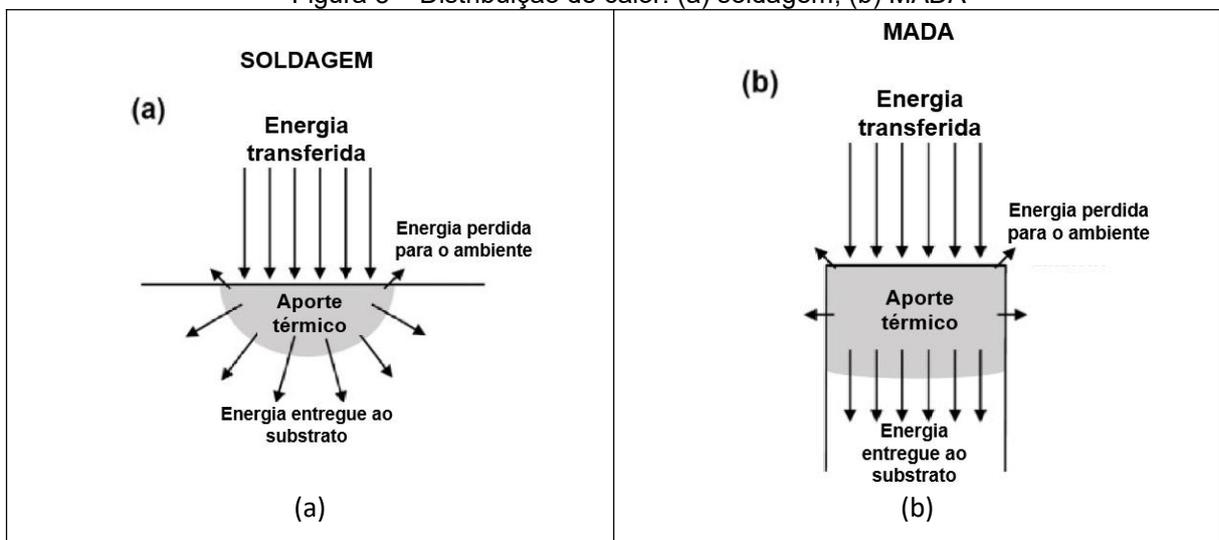
função da menor quantidade de parâmetros operacionais que envolvem o processo (MARQUES, MODENESI e BRACARENSE, 2011).

O presente trabalho propõe utilizar o processo GMAW-P para a MADA com o controle sinérgico, evitando assim o grande número de variáveis operacionais que os pesquisadores supracitados buscaram evitar em seus trabalhos. A deposição metálica por GMAW-P garante vantagens: melhor estabilidade de arco, estabilidade de transferência metálica, aporte térmico mais controlável e baixo nível de respingos (SCOTTI e PONOMAREV, 2014).

### 2.3 MANUFATURA ADITIVA VIA GMAW PULSADO

Da classe de processos MA de ligas metálicas, o processo MADA imprime grande aporte térmico e, em decorrência desse fato, as peças começam a acumular uma carga térmica elevada, ocasionando efeitos deletérios na estabilidade do processo e na composição metalúrgica do material depositado (WEI *et al.*, 2019; TREUTLER e WESLING, 2021). De maneira geral, a difusão térmica na MA ocorre de maneira diferente em comparação aos processos de soldagem, uma vez que na soldagem a difusão térmica é mais efetiva pois o calor da poça de fusão distribui-se por toda chapa, ver Figura 5 (a). Na MADA, a medida em que a parede metálica vai se desenvolvendo, camada sobre camada, o calor proveniente do processo tende a se distribuir de forma descendente como mostra a Figura 5 (b) (MOHEBBI, KÜHL e PLOSHIKHIN, 2020; KLOBČAR *et al.*, 2020).

Figura 5 – Distribuição de calor: (a) soldagem; (b) MADA



Fonte: Adaptado de Mohebbi, Kuhl & Ploshikhin (2020)

O GMAW, amplamente conhecido como *Metal Inert Gas/Metal Active Gas* (MIG/MAG), é um dos processos mais explorados em MA de ligas metálicas, com destaque especial para componentes de grandes dimensões (1000 a 3000 mm). Atualmente, esse tipo de soldagem é utilizado nas operações de revestimento, amanteigamento e recuperação de estruturas metálicas (VENTURINI *et al.*, 2016; WILLIAMS *et al.*, 2016; KÜHNE *et al.* 2019, TREUTLER e WESLING, 2021). O GMAW proporciona elevada taxa de deposição, cerca de 3 kg/h ~ 7,8 kg/h. além de possibilitar controle preciso da tensão, corrente e velocidade de alimentação. Esse tipo de soldagem tem amplo acoplamento nos controles mecanizados/automáticos de trajetória, uma vez que existem diversas formas e tipos de tocha para este fim. E como já citado anteriormente, possui um custo de aquisição e de manutenção bem menor em comparação aos processos a laser (LIBERINI *et al.*, 2017; HUANG *et al.*, 2020; BOURLET *et al.*, 2020).

Há ressalvas necessárias em relação ao GMAW empregado na MA de ligas metálicas. Existe risco de distorção geométrica em decorrência do aporte de calor excessivo, elevados níveis de tensões residuais de origem térmica, a necessária usinagem de acabamento da peça fabricada e o tratamento térmico do componente para alívio das tensões residuais de origem térmica (LEE *et al.*, 2018; JAFARI, VANEKER e GIBSON, 2021; SEO e LEE, 2021). Logo, parametrizar o processo adequadamente é fator crucial para o controle da microestrutura do material depositado, da temperatura entre camadas e da atenuação de distorções geométricas. Esse tipo de controle é fulcral para viabilidade dessa tecnologia.

### 3 FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA

Como citado anteriormente, para o processo de manufatura aditiva a arco elétrico, os conhecimentos sobre metalurgia da soldagem são revisitados (OLIVEIRA *et al*, 2020). A parametrização é o fator primordial para se ter uma boa peça gerada na MADA. O controle de trajetória pode ser implementado de diversas formas: braços robóticos ou cabeçotes controlados por motores de passo, similar as impressoras 3D de polímeros convencionais. A chave para a boa utilização da MADA via GMAW-P passa pelo conhecimento da natureza e peculiaridades desse modo de transferência. Pois, o fator geométrico impera na manufatura aditiva, e com isso podemos controlar espessura da deposição e buscar certas características que minimizem quaisquer tipos de distorção ou defeitos (KLOBCAR *et al*, 2020).

#### 3.1 PROCESSOS GMAW COM CONTROLE DE TRANSFERÊNCIA METÁLICA

Uma das maiores inovações apresentadas nos últimos anos como forma de aperfeiçoamento do processo GMAW, são os controles dinâmicos de transferência metálica. Basicamente, é o domínio do sinal de corrente, de forma dinâmica e cíclica, objetivando deposições metálicas de forma mais controlada possível. As finalidades para tal controle são: garantir uma transferência metálica mais uniforme, uma poça de fusão de pequeno volume e uma relação taxa de deposição controlada através da distribuição do calor entre eletrodo e o metal de base (SCOTTI e PONOMAREV, 2014).

##### 3.1.1 Transferência arco spray pulsado (GMAW-P)

O processo GMAW-P apareceu com o intuito de se reunir as melhores características das versões por curto-circuito e goticular em um só processo, objetivando uma transferência estável e regular com um aporte térmico razoável. A corrente oscila entre dois níveis, chamados de corrente de base e corrente de pulso (SCOTTI e PONOMAREV, 2014).

A corrente de base possui a função de manter o arco aberto com baixa energia. A corrente de pulso, tem a função de formar a gota na ponta do arame eletrodo e, em seguida, atuar no seu destacamento devido as forças eletromagnéticas (efeito *Pinch*). Os tempos de pulso e de base definem o período de pulso, que é o inverso da frequência de pulsação (SCOTTI e PONOMAREV, 2014).

A tensão de soldagem acompanha a modulação imposta pela corrente. Sua amplitude depende do tipo de gás de proteção e do comprimento de arco para uma dada condição. A corrente média é a média ponderada das correntes de pulso e de base. É importante destacar que a tensão de soldagem do GMAW pulsado é cerca de 20% maior do que uma soldagem GMAW por curto-circuito na mesma corrente média (SCOTTI e PONOMAREV, 2014).

Durante a fase de pulso, uma ou mais gotas podem ser formadas e transferidas. Entretanto, têm-se observado que a condição mais estável se dá em uma gota por pulso (UGPP), com diâmetro próximo ao do arame eletrodo. Tempos de pulso mais longos do que o necessário, resultam em perda de estabilidade da transferência metálica. Desta forma, deve-se procurar valores corretos de corrente de pulso e tempo de pulso para que se tenha a condição de UGPP (SCOTTI e PONOMAREV, 2014).

Uma característica importante da transferência pulsada é que as gotas metálicas são transferidas em linha com o eixo do eletrodo. Essa característica é de suma importância para a Manufatura Aditiva por Deposição ao Arco (MADA), uma vez que garantir uma geometria constante e previsível é um dos fatores mais relevantes para aplicabilidade desta técnica (OLIVEIRA *et al*, 2020).

### **3.1.2 Análise dos parâmetros de transferência metálica GMAW-P**

O tempo de pulso, determina o número de gotas que podem ser formadas e destacadas durante o pulso de corrente. Se o tempo de pulso é grande o suficiente, outras gotas podem ser destacadas durante um mesmo pulso, este comportamento é denominado de Mais de Uma Gota por Pulso (+UGPP). Se o tempo de pulso é pequeno, ele se torna insuficiente para se formar a gota e destacá-la no pulso, este comportamento é chamado Menos de Uma Gota por Pulso (-UGPP). Ambos comportamentos (-UGPP e +UGPP) são indesejáveis, por provocarem um

desbalanceamento instantâneo entre a taxa de fusão e a velocidade de alimentação, levando a instabilidades no comprimento de arco, ondulação na superfície do cordão e distorções geométricas na peça (SCOTTI e PONOMAREV, 2014).

Negligenciar destacamento do tipo UGPP pode levar a resultados insatisfatórios com a utilização do GMAW-Pulsado. Recomenda-se sempre buscar a transferência dentro do pulso. É recomendável também que o diâmetro da gota seja próximo ao do arame eletrodo. Os parâmetros que levem à condição de UGPP são determinados para cada combinação de diâmetro do arame eletrodo, sua composição química e tipo de gás de proteção utilizado. A experiência tem mostrado que uma distância Bico Contato Peça (DBCP) em torno de 15 a 18mm é razoável de se utilizar (SCOTTI e PONOMAREV, 2014). Recomenda-se uma corrente de base de 35 a 40A, para manter o arco, e frequências de pulso acima de 20Hz. Embora seja aceito a hipótese de que a corrente de base somente mantém o arco aberto sem afetar a formação da gota, investigações recentes mostram que o tamanho da gota e a taxa de fusão podem ser significativamente afetados pela magnitude e duração da corrente de base (SCOTTI e PONOMAREV, 2014).

Como já mencionado, o diâmetro da gota deve ser o mais próximo possível do diâmetro do eletrodo, essa característica também só é possível de se constatar com o uso de instrumentação especial. Porém, levando-se em consideração que o volume da parcela fundida do arame eletrodo que se transforma em gota é igual ao da gota formada, e que estes dois corpos têm as formas cilíndrica e esférica, respectivamente, e ainda que a razão velocidade de alimentação pela frequência de destacamento representa o volume da parcela fundida do arame eletrodo que se transforma em gotas se destacando por unidade de tempo, pode-se estimar através da Equação 1 o diâmetro da gota (SCOTTI e PONOMAREV, 2014).

$$d_g(mm) = \sqrt[3]{\frac{25\theta_e(mm) \cdot V_{alim}(\frac{m}{min})}{f_p(Hz)}}$$

[1]

Onde  $\theta_e$  é o diâmetro do arame,  $V_{alim}$  é a velocidade de alimentação e  $f_p$  a frequência de pulso.

A forma mais rápida para se determinar a regulagem da velocidade de alimentação é iniciar a soldagem com uma velocidade alta e abaixá-la. Existe, porém, uma forma de mensurar a velocidade de alimentação, ela é mostrada na Equação 2. Nesse modelo, a velocidade de alimentação é função da frequência de pulso ( $f_p$ ) e do diâmetro do arame eletrodo ( $\theta_e$ ) (SCOTTI e PONOMAREV, 2014).

$$V_{alim} \left( \frac{m}{min} \right) = 0,04 f_p (Hz) \theta_e (mm)$$

[2]

### 3.1.3 Fontes de soldagem GMAW pulsado

As primeiras fontes comerciais GMAW-P, nos anos de 1970, eram do tipo tensão constante. No caso, a tensão era imposta e a corrente era consequência da carga, ou seja, comprimentos do arco, tipo de consumíveis e etc; influíam na carga imposta. Desta forma, a pulsação se dava através do sinal de tensão. Assim, a inconstância do comprimento de arco, por exemplo, fazia com que houvesse certa oscilação no valor da corrente de pulso, desestabilizando o modo de transferência. Outra grande limitação do processo GMAW-P daquela época era o fato de que as fontes não utilizavam transistores e tiristores para modulação dos sinais elétricos. As máquinas da época só permitiam pulsar numa frequência múltipla da frequência da rede pública. Desta forma, tornava-se quase impossível se obter uma transferência estável do tipo UGPP (SCOTTI e PONOMAREV, 2014).

Com o advento dos equipamentos com fontes chaveadas, já nos anos de 1980, se possibilitou controlar, independentemente, o sinal da corrente ou da tensão. Duas abordagens para o processo GMAW-P foram seguidas comercialmente. Na primeira, usou-se uma fonte dita mista, que se comporta com tensão constante durante os tempos de base. Desta forma, os parâmetros de regulagem do pulso passam a ser tensão de pulso, tempo de pulso, corrente de base e tempo de base. Com isto, garante-se razoável controle do comprimento de arco durante a fase de pulso. Apesar de diminuir os problemas, esta primeira abordagem vem perdendo espaço comercial nos dias atuais (SCOTTI e PONOMAREV, 2014).

Na segunda abordagem, a fonte trabalha totalmente no modo de imposição de corrente, com possibilidade de regular correntes de pulso e de base além dos tempos de permanência dessas correntes. A desvantagem desta abordagem é que, por ser corrente imposta, o autocontrole de comprimento de arco não atua, fato que precisa ser compensado por um controle externo, baseado na diferença entre tensão de arco e uma tensão de referência (SCOTTI e PONOMAREV, 2014).

O controle externo pode se dar tanto pela variação da velocidade de alimentação como pela correção da frequência de pulsação e/ou corrente de base, sendo que o controle por alimentação possui resposta dinâmica mais lenta e mais complicada, porém é a forma que mantém o valor de corrente média mais estável (SCOTTI e PONOMAREV, 2014).

#### **3.1.4 Soldagem GMAW pulsado sinérgico**

É evidente a importância de se regular corretamente os parâmetros de pulso e a velocidade de alimentação para atingir a condição adequada da soldagem GMAW-P. A seleção dos parâmetros não é trivial, frente as diversas inter-relações. Assim, uma grande barreira para utilização do GMAW-P reside parametrização que garanta esse tipo de transferência metálica. O operador teria que saber, previamente, pelo menos os valores determinados experimentalmente de corrente de pulso e tempo de pulso, para a combinação de gás de proteção e arame eletrodo que irá utilizar. Além disso, determinar a velocidade de alimentação adequada para cada corrente média desejada. Em resumo, para utilizar o GMAW-P, o operador deveria ter noção de cinco parâmetros: corrente de pulso, tempo de pulso, corrente de base, tempo de base e velocidade de alimentação (SCOTTI e PONOMAREV, 2014).

Por esse motivo, desde a década de 1980, os equipamentos para GMAW-P vêm acompanhados do chamado controle sinérgico. O controle sinérgico em soldagem GMAW-P, pode ser definido como qualquer sistema onde um ou mais parâmetros envolvidos na transferência metálica são automaticamente modificados em função de outro parâmetro operacional mais simples de se determinar e controlar, de tal forma que a condição de estabilidade da transferência de gotas é mantida ao longo do processo buscando a condição de UGPP (SCOTTI e PONOMAREV, 2014).

Este comando funciona da seguinte maneira: existe no equipamento um banco de dados e rotinas computacionais que enviam sinais de controle ao equipamento para reajustar a combinação dos parâmetros de pulso, qualquer que seja a velocidade de alimentação e tensão de referência selecionados. Este banco de dados é criado de forma experimental, cobrindo normalmente aço de baixo carbono, aço inoxidável, alumínio ao silício, alumínio ao magnésio, ligas de alto teor de cobre e eletrodos tubulares; cobrindo também os diâmetros de arame comerciais e gases de proteção mais utilizados para estes materiais. Tanto o banco de dados, como as rotinas, são segredos industriais de cada fabricante (SCOTTI e PONOMAREV, 2014).

Vale destacar, novamente, que toda regulação do controle sinérgico visa a condição de UGPP. Então, utilizar o modo sinérgico no processo MADA é de suma importância, uma vez que a parametrização para manufatura aditiva a arco possui elevado critério de seleção, visto que as peças impressas precisam ter excelente geometria e integridade estrutural.

### 3.2 PLANEJAMENTO DE EXPERIMENTOS FATORIAL

O planejamento de experimentos fatorial é uma técnica utilizada para investigar o efeito de diferentes variáveis em uma resposta específica. No caso do fatorial  $2^3$ , há três variáveis, cada uma com dois níveis. Isso significa que há um total de  $2 \times 2 \times 2 = 8$  combinações possíveis desses níveis (NETO, SCARMINIO, BRUNS, 2010).

O objetivo do planejamento de experimentos fatorial é avaliar o efeito de cada variável individualmente, bem como seus efeitos combinados. É possível usar métodos estatísticos para analisar os dados e determinar quais variáveis têm um efeito significativo na resposta e como as diferentes combinações de níveis afetam a mesma (NETO, SCARMINIO, BRUNS, 2010).

O planejamento fatorial  $2^3$  é frequentemente utilizado em experimentos de engenharia e ciências da natureza. É uma técnica poderosa para otimizar processos e reduzir custos, uma vez que permite identificar rapidamente quais variáveis têm o maior impacto na resposta e como elas devem ser ajustadas para obter a melhor

performance possível, de acordo com o tipo de processo que se está analisando (NETO, SCARMINIO, BRUNS, 2010).

## 4 OBJETIVOS

### 4.1 GERAL

Avaliar, através de um planejamento de experimentos fatorial  $2^3$ , a influência da Tensão (U), Velocidade de Alimentação (VAL) e Velocidade de Soldagem (VS) na Manufatura Aditiva utilizando o processo GMAW-P com controle sinérgico para fundir aço inoxidável ER309LSi.

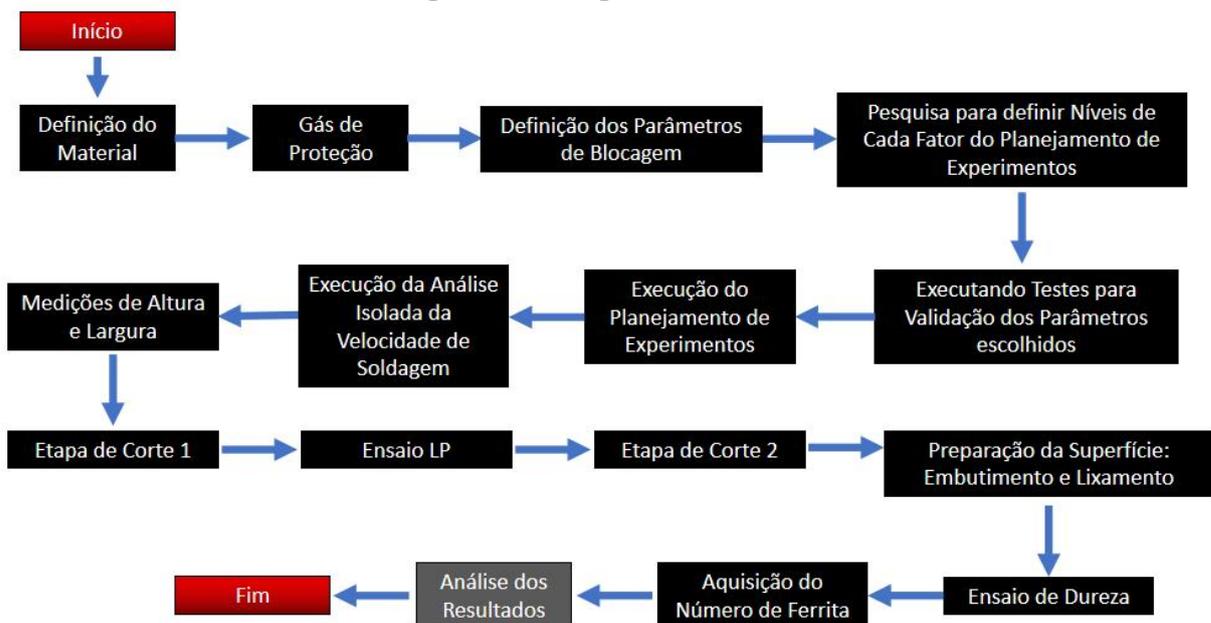
### 4.2 ESPECÍFICOS

- Avaliar a resposta da altura e largura das amostras fabricadas por MADA em relação aos parâmetros estudados;
- Verificar a presença de defeitos superficiais através do ensaio de líquido penetrante das amostras fabricadas por MADA;
- Avaliar a influência dos parâmetros em relação ao nível de respingos;
- Avaliar a influência dos parâmetros em relação a quantidade de ferrita em matriz austenítica através da aquisição do Número de Ferrita (NF);
- Avaliar a influência dos parâmetros em relação a dureza Rockwell (HRB);
- Avaliar a influência da energia imposta no processo em relação a dureza e número de ferrita.

## 5 METODOLOGIA

Aqui serão detalhadas todas as etapas envolvidas no trabalho. A realização de toda a pesquisa foi conduzida no Instituto Nacional de Tecnologia e Revestimento de materiais (INTM). Na Figura 6 consta o fluxograma com toda a progressão do trabalho realizado na pesquisa.

Figura 6 – Fluxograma de trabalho



Fonte: Autor (2023)

### 5.1 CONSUMÍVEIS

O material trabalhado na manufatura aditiva foi uma bobina de arame eletrodo ER 309LSi da marca *Böhler Welding*. O diâmetro desse arame é 1,2 mm. A composição química desse aço está contida na Tabela 1.

Tabela 1 – Composição química do aço utilizado na MADA

	Fe	C	Si	Mn	P	S	Cr	Ni
Percentual em peso (%)	59,9	0,02	0,85	2,1	0,015	0,015	23,5	13,6

Fonte: Voestalpine.com (2023)

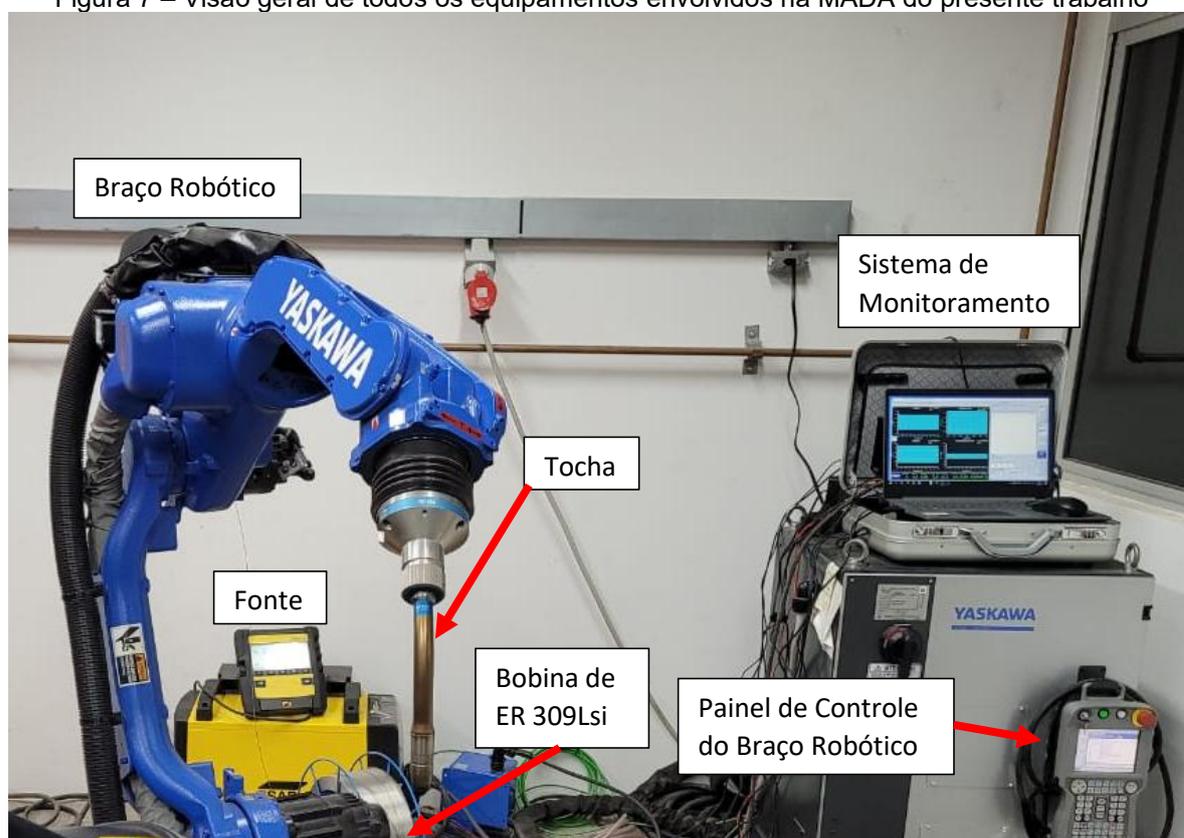
Para o gás de proteção, seguindo a recomendação da AWS para o ER 309LSi, utilizou-se uma mistura de gás inerte com 98% de Argônio e 2% e CO<sub>2</sub>.

Esse gás é referenciado como M12 na norma ISO 14175. A vazão de gás utilizada foi a máxima recomendada pela AWS SFA 5.9 ER 309Lsi para o diâmetro de 1,2 mm: 18 L/min.

## 5.2 EQUIPAMENTOS UTILIZADOS NA MANUFATURA ADITIVA

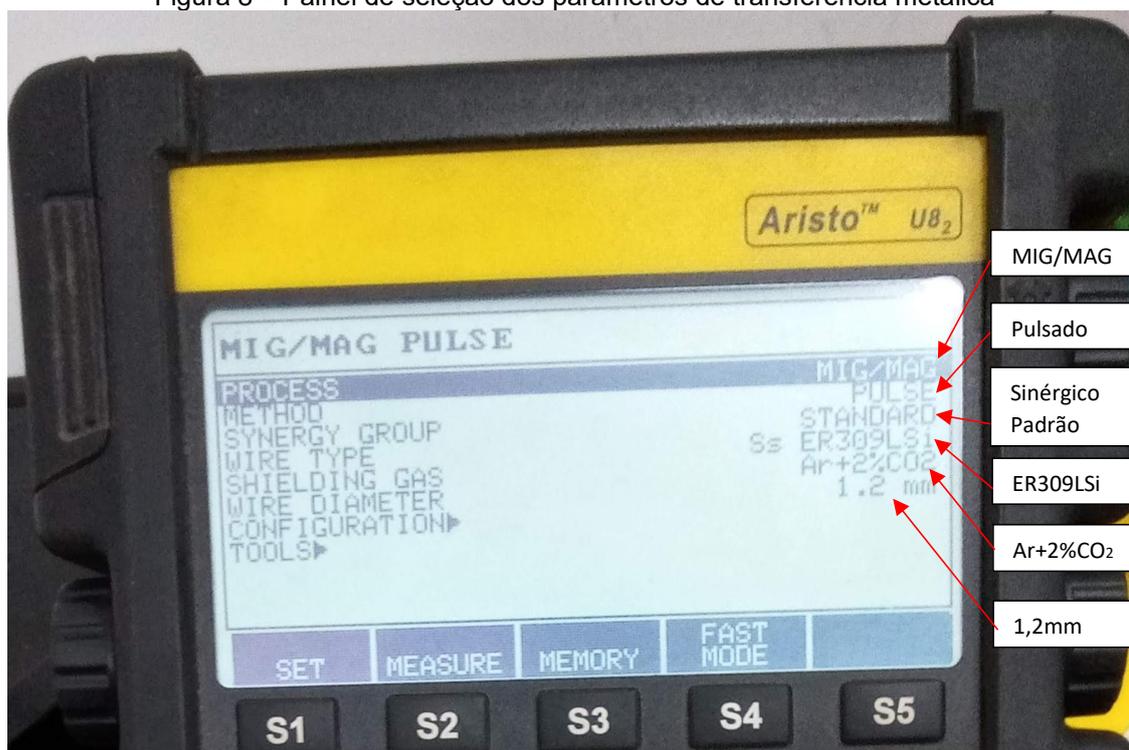
Os equipamentos utilizados nesta pesquisa para realizar a MADA estão mostrados na Figura 7. O controle de trajetória do processo é o braço robótico da marca YASKAWA acoplado com uma tocha TBI RM-62G. A fonte de soldagem é uma ESAB Mig 4004i Pulse acoplada com painel de controle digital Aristo U82. O sistema de alimentação de arame é da mesma marca da fonte. O sistema de monitoramento da soldagem é da marca IMC, com ele é possível uma visualização em tempo real dos comportamentos dinâmicos da transferência metálica, bem como obter a energia imposta durante todo processo. A Figura 8 mostra de forma mais detalhada o painel de seleção dos parâmetros de soldagem da fonte.

Figura 7 – Visão geral de todos os equipamentos envolvidos na MADA do presente trabalho



Fonte: Autor (2023)

Figura 8 – Painel de seleção dos parâmetros de transferência metálica



Fonte: Autor (2023)

### 5.3 DEFINIÇÃO DOS NÍVEIS DE CADA FATOR

Nesta fase do trabalho, buscou-se avaliar quais seriam os níveis superior e inferior que cada parâmetro (fator) de estudo iria receber. Esta etapa é de suma importância pois, ao buscar na literatura técnica os valores de referência para todas as variáveis, deve-se constatar se estes valores são aplicáveis e viáveis para o tipo de estudo que se deseja fazer. Os parâmetros que serão alvo de estudo no primeiro momento serão Tensão (V) e Velocidade de Alimentação (m/min). De acordo com a AWS SFA 5.9 a tensão recomendada para ER309LSi com de diâmetro de 1,2mm e utilizando transferência arco spray varia entre 25V e 30V. Para a Velocidade de Alimentação utilizou-se a Equação 2.

Consultando a literatura em busca de valores de frequência razoáveis para viabilizar a equação anterior, obteve-se os seguintes valores 40Hz, 60Hz e 80Hz. Na Tabela 2 contém essa determinação dos valores de velocidade de alimentação (QUEGUINEUR *et al.*, 2018; CUNNINGHAM *et al.*, 2018, 2019, 2021; XIE, XUE e REN, 2020; YAO *et al.*, 2021).

Tabela 2 – Determinação da velocidade de alimentação pela Equação 2

Frequência (Hz)	Valim = $0,04 \cdot (fp)^{1,2}$ (m/min)	Valores arredondados de Valim (m/min)
40	1,92	<b>2</b>
60	2,88	<b>3</b>
80	3,84	<b>4</b>

Fonte: Autor (2023)

Em relação a Velocidade de Soldagem (VS) (cm/min) buscou-se, primeiramente, utilizar um valor fixo de 18 cm/min. Tendo todos esses pontos elencados, a Tabela 3 contém todos os parâmetros de blocagem (parâmetros fixos) do pré-planejamento de experimentos fatorial  $2^3$ . Na Tabela 4 estão todos os experimentos para avaliação do comportamento desses parâmetros supracitados na MADA. Os testes iniciais contemplaram 10 camadas por experimento, com 100 mm de comprimento e 2 minutos de intervalo entre camadas. O objetivo era verificar se à medida em que o processo MADA iria se desenvolvendo, alguma distorção de origem térmica iria ocorrer.

Tabela 3 – Parâmetros de blocagem

Distância Bico contato Peça	15 mm
Gás de Proteção	Ar 98% + 2% CO <sub>2</sub>
Vazão do Gás de Proteção	18 L/min
Arame Eletrodo	ER 309LSi
Diâmetro do Arame Eletrodo	1,2 mm
Tempo Entre Camadas	120 segundos

Fonte: Autor (2023).

Tabela 4 – Tabela de experimentos para validação dos valores de Tensão e Velocidade de Alimentação

Experimento	Tensão	Vel. De Alimentação
1	25 V	3 (m/min)
2	25 V	4 (m/min)
3	25 V	2 (m/min)
4	27 V	3 (m/min)
5	27 V	4 (m/min)
6	27 V	2 (m/min)
7	23 V	3 (m/min)
8	23 V	4 (m/min)
9	23 V	2 (m/min)

Fonte: Autor (2023)

Na Figura 9 contém a imagem dos experimentos da Tabela 4. Constatou-se que os níveis trabalhados de tensão e velocidade de alimentação estavam adequados, ou seja, as camadas depositadas estavam sem distorção e o processo de transferência metálica apresentou estabilidade.

Figura 9 – Paredes de aço ER309LSi fabricados por MA com parâmetros listados na Tabela 4



Fonte: Autor (2023)

Para investigar, isoladamente, o efeito que o deslocamento da tocha implica na geometria da parede metálica produzida por MADA, se fixou os parâmetros de melhor estabilidade 25V e 3 (m/min) e começou-se a variar a velocidade de soldagem entre o intervalo de 26 (cm/min) até 10 (cm/min). O valor de 26 (cm/min) foi trabalhado pelo Sopelsa (2013). Como os experimentos anteriores foram feitos na velocidade de soldagem de 18 (cm/min), optou-se por incrementos de 2 (cm/min) para cada amostra até atingir o valor de 26 (cm/min). Da mesma forma foram feitos decrementos de 2 (cm/min) na mesma quantidade até atingir 10 (cm/min). A Tabela 5 contém ordem em que foram feitos os experimentos e a Figura 10 mostra as paredes resultantes. Com relação ao número de camadas, nesses experimentos, foram reduzidos de 10 para 6 camadas. O objetivo disso foi economizar tempo e material, uma vez que já se tinha o conhecimento da estabilidade da deposição.

Tabela 5 – Experimentos apenas variando a velocidade de soldagem (deslocamento da tocha)

Parâmetros fixos: Tensão = 25 [V] ; Velocidade de Alimentação 3 [m/min]	
Experimentos	Velocidade de Soldagem (cm /min)
1	20
2	16
3	22
4	14
5	24
6	12
7	26
8	10

Fonte: Autor (2023)

Figura 10 – Paredes de aço ER 309LSi fabricados por MADA com parâmetros listados na Tabela 5



Fonte: Autor (2023)

Observa-se na imagem anterior que na menor velocidade de soldagem testada, experimento 8, as camadas começaram a escorrer e apresentar distorções, uma vez que a baixa velocidade de soldagem implica em maior quantidade de material fundido por milímetro e, conseqüentemente, a taxa de resfriamento é atenuada. Então, a camada de material recém depositada tende a passar mais tempo na fase fluida, com isso ela tende a deformar mais por ação da gravidade e também pelo material sendo fundido a jusante.

O critério de escolha dos níveis de deslocamento de tocha para o planejamento de experimentos fatorial  $2^3$ , foram os três experimentos que

representaram maior espessura antes de ocorrer distorções na sobreposição de camadas, são eles: 2 (16cm/min), 4 (14cm/min) e 6 (12 cm/min).

#### 5.4 PLANEJAMENTO DE EXPERIMENTOS

Nesta fase, se tem definidos todos os níveis que serão utilizados para montar o fatorial  $2^3$ . A Tabela 6 contém o resumo dos fatores e níveis trabalhados. Será feito um fatorial completo de 2 níveis 3 fatores. O ponto central serve para indicar se a influência da variação entre os níveis está seguindo uma tendência linear e, com isso, aumenta-se o ajuste e a previsibilidade dos modelos gerados pela análise (NETO, SCARMINIO, BRUNS, 2010).

Tabela 6 – DOE 3 fatores, 2 Níveis mais ponto central

<b>FATOR</b>	<b>Nível Inferior (-1)</b>	<b>Ponto Central (0)</b>	<b>Nível Superior (+1)</b>
Vel. de Soldagem: <b>(A)</b> <b>VS</b> = (cm/min)	12	14	16
Vel. Alimentação: <b>(B)</b> <b>VAL</b> = (m/min)	2	3	4
Tensão: <b>(C)</b> <b>U</b> = (V)	23	25	27

Fonte: Autor (2023)

Com o objetivo de obter maior precisão nas respostas e diluir os chamados ruídos experimentais, o planejamento experimental foi realizado em triplicata e aleatorizado (NETO, SCARMINIO, BRUNS, 2010). O *software* estatístico utilizado para tal fim foi o Minitab®. A Figura 11 mostra como os níveis A, B e C estão dispostos em cada experimento.

Figura 11 – Sequência de experimentos aleatorizados gerados pelo Minitab

1	+	-	-	10	-	+	+	19	0	0	0
2	-	-	+	11	+	+	+	20	+	+	+
3	-	-	-	12	+	-	+	21	-	+	+
4	0	0	0	13	+	-	+	22	-	+	-
5	-	-	-	14	+	-	-	23	-	+	+
6	-	+	-	15	-	-	+	24	-	-	+
7	+	+	-	16	+	+	+	25	+	+	-
8	+	-	+	17	-	+	-	26	-	-	-
9	+	-	-	18	+	+	-	27	0	0	0

Fonte: Autor (2023)

Para entender a tabela contida na figura anterior, seja a condição 1 o exemplo. Nesse experimento, teremos o Fator (A) em nível superior, Fator (B) em nível inferior e Fator (C) em nível inferior. Isso significa que o Experimento 1 terá os seguintes parâmetros: VS = 16 cm/min, VAL = 2 m/min e U = 23V; da mesma forma se procede em todos os experimentos. Os experimentos com fatores “000” referem-se à condição de ponto central.

Serão seis camadas depositadas em cada experimento, como já mencionado anteriormente, é um número de camadas suficientes para o objeto de estudo tratado neste trabalho.

## 5.5 EXECUÇÃO DOS EXPERIMENTOS

Todos os substratos que servem de base foram feitos em chapa de aço ASTM A36 com retirada da camada de óxido com lixadeira rotativa e alinhamento da mesma com nível bolha, ver Figura 12. Para minimizar o empenamento em decorrência contração térmica gerada, são posicionados grampos em cada extremidade.

Figura 12 – Preparando o substrato para execução dos experimentos



Fonte: Autor (2023)

A chapa mostrada na imagem anterior serviu de substrato para os experimentos 17 até o 27. A Figura 13 mostra como os experimentos foram sendo depositados no substrato. Essa imagem mostra o substrato onde foram depositados os 16 primeiros experimentos.

Figura 13 – Execução dos primeiros 16 experimentos



Fonte: Autor (2023)

## 5.6 MENSURAÇÃO DO NÍVEL DE RESPINGOS

O nível de respingos é uma característica de muita importância na soldagem para controle de defeitos e de material desperdiçado, na MADA via GMAW-P não seria diferente. Geralmente, as mensurações de respingos são feitas de forma qualitativa e varia de processo a processo, uma vez que o nível de respingos considerados bom em um tipo de condição, pode ser avaliado como péssimo em outra condição. Tendo isto elencado, o autor criou uma escala de respingos baseado na sua observação do pré-planejamento dos experimentos, veja Tabela 7.

Tabela 7 – Critério de análise do nível de respingos

Critério	Nota
Arco <b>Estável</b> e <b>Sem Respingos</b>	<b>4</b>
Arco <b>Estável</b> com Respingos <b>Esporádicos</b>	<b>3</b>
Arco <b>Estável</b> com Respingos <b>Frequentes</b>	<b>2</b>
Arco <b>Instável</b> com Respingos <b>Frequentes</b>	<b>1</b>

Fonte: Autor (2023)

Como o efeito é bastante aleatório, a nota foi atribuída por camada, e no final foi calculado uma média aritmética daquele experimento realizado. Com isso, obteve-se uma forma de quantificar e correlacionar a influência do fator (parâmetro) no nível de respingos.

## 5.7 MENSURAÇÃO DA ALTURA E LARGURA

As medições foram realizadas utilizando um paquímetro digital de resolução 0,01mm. Para cada experimento, as medidas foram realizadas em 5 pontos como ilustra a Figura 14. Em cada ponto se mediu altura e largura. Ao finalizar essas medições, retirou-se o valor médio das cinco medições e inseriu-se os valores no planejamento de experimentos.



Fonte: Autor (2023)

Da mesma forma se mediu em relação aos experimentos realizados da Tabela 5, para o estudo isolado e aprofundado da influência da velocidade de soldagem na geometria da deposição.

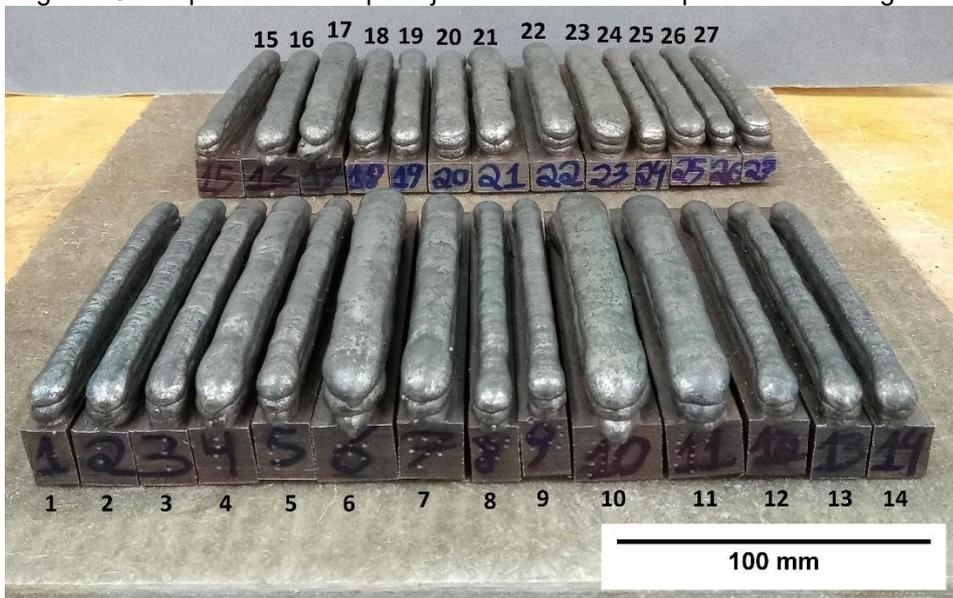
## 5.8 CORTES PARA SEPARAÇÃO DE CADA CONDIÇÃO DO DOE

Nesta etapa, realizou-se os cortes na serra fita para separação de cada condição experimental. Separar cada condição é necessário para que sejam viabilizadas todas as demais etapas da pesquisa. A Figura 15 mostra o substrato sendo cortado para separação de cada condição. A máquina utilizada para tal fim é a serra fita FM-30 da Franho. A Figura 16 mostra o processo totalmente finalizado e cada experimento com sua respectiva identificação.

Figura 15 – Separação de cada condição experimental do substrato



Fonte: Autor (2023)

Figura 16 – Experimentos do planejamento fatorial  $2^3$  separados e catalogados

Fonte: Autor (2023)

## 5.9 ENSAIO DE LÍQUIDO PENETRANTE (LP)

O ensaio de líquido penetrante é um método de ensaio não destrutivo utilizado para detectar descontinuidades superficiais em materiais não porosos. O processo envolve a limpeza e a secagem da superfície a ser inspecionada, a aplicação de um líquido penetrante, a remoção do excesso de líquido e a aplicação de um revelador. O líquido penetrante entra nas descontinuidades (poros, trincas, mordeduras) da superfície e o revelador indica onde estão essas descontinuidades. Esse ensaio é amplamente utilizado na indústria para inspecionar peças e cordões de solda em busca de defeitos superficiais.

O LP foi realizado seguindo as recomendações do fabricante dos produtos utilizados no ensaio. Antes de aplicar o penetrante (Metal Check VP 30) em cada experimento, utilizou-se escova de aço para retirar qualquer impureza das amostras e aplicou-se um removedor de óleo em seguida. A etapa seguinte, consistiu na aplicação do penetrante durante 15 minutos. Passado o tempo, retirou-se o penetrante com fluxo pequeno de água e sem jato. Por fim, aplicou-se o revelador Metal Check D70. A Figura 17 contém a imagem durante o tempo de espera do penetrante. As imagens do ensaio finalizado constam na seção dos resultados.

Figura 17 – Ensaio LP sendo realizado



Fonte: Autor (2023)

## 5.10 REMOÇÃO DE PORÇÃO CENTRAL DE CADA EXPERIMENTO

Para que os ensaios de dureza e número de ferrita fossem feitos, realizou-se a remoção de uma seção transversal, de cada condição do planeamento experimental, de aproximadamente 10 mm cada. Essa etapa de corte foi realizada em outra serra fita, com passo de dente menor que a primeira serra utilizada na etapa de corte. A Figura 18 mostra condição 25 sendo cortada, o mesmo corte foi feito para as outras condições.

Figura 18 – Exemplo de remoção de porção central de cada condição



Fonte: Autor (2023)

## 5.11 PREPARAÇÃO DAS AMOSTRAS PARA O ENSAIO DE DUREZA E AQUISIÇÃO DO NÚMERO DE FERRITA

Com todas as porções de metal devidamente cortadas, realizou-se o embutimento em baquelite na embutidora Arotec PRE 40 automática. Para a preparação da superfície, os lixamentos e polimentos foram realizados na Arotec Aropol VV. Ambos equipamentos estão na Figura 19.

Figura 19 – Equipamentos para auxiliar na preparação das superfícies: (a) Embutidora; (b) suporte rotativo para lixamento/polimento



Fonte: Autor (2023)

A superfície foi preparada seguindo a progressão de lixas: 60, 80, 180, 320, 420, 600, 800, 1000 e 1200. Em seguida se utilizou pasta de diamante de 1 micrometro para espelhamento da superfície. Após realizados os ensaios de dureza, o embutimento foi realizado e se passou novamente as lixas 800 e 1000. O embutimento com a marca do penetrador do ensaio de dureza auxiliou na aquisição do número de ferrita na região onde ocorreu a aquisição da dureza. A Tabela 8 contém as amostras embutidas que cada combinação de fatores do planejamento experimental produziu.

Tabela 8 – Amostras embutidas de cada condição utilizadas no ensaio de dureza e medição do número de ferrita

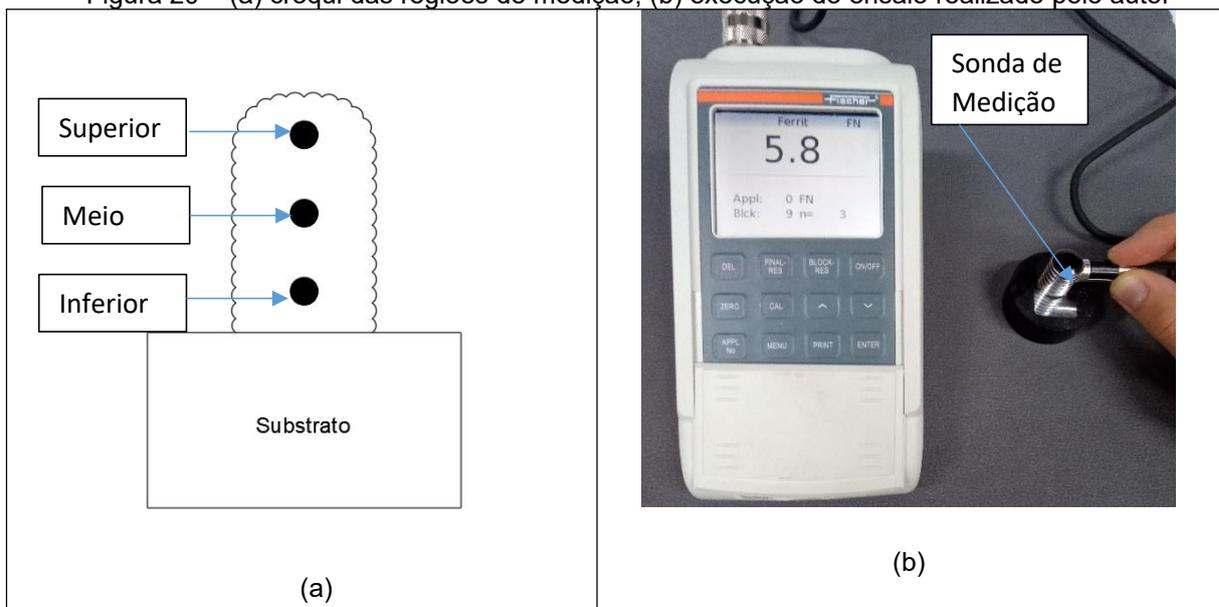
 <p>VS=12(cm/s); Valim= 2 (m/min); U = 23(V)</p>	 <p>VS=16(cm/s); Valim= 2 (m/min); U = 23(V)</p>
 <p>VS=12 (cm/s); Valim= 4 (m/min); U = 23 (V)</p>	 <p>VS=16 (cm/s); Valim= 4 (m/min); U = 23 (V)</p>
 <p>VS=12 (cm/s); Valim= 2 (m/min); U = 27(V)</p>	 <p>VS=16(cm/s); Valim= 2 (m/min); U = 27(V)</p>
 <p>VS=12(cm/s); Valim= 4 (m/min); U = 27(V)</p>	 <p>S=16(cm/s); Valim= 4 (m/min); U = 27(V)</p>
 <p>VS=14(cm/s); Valim= 3 (m/min); U = 25(V)</p>	

Fonte: Autor (2023)

## 5.12 AQUISIÇÃO DO NÚMERO DE FERRITA (NF)

A medição do número de ferrita foi realizada pelo ferritoscópio FM30 da Fischer. As medições foram feitas da seguinte maneira: 5 medições próximas ao substrato, 5 medições no meio e 5 medições próximas ao topo. Calculada as médias de cada região, fez-se a média das médias para obter um valor único para cada amostra. A Figura 20 (a) mostra um esquemático das regiões que foram medidas no ferritoscópio. A Figura 20 (b) mostra como a aquisição é realizada na prática. A Tabela 9 contém todos os NF médios calculados que irão para o planejamento de experimentos.

Figura 20 – (a) croqui das regiões de medição; (b) execução do ensaio realizado pelo autor



Fonte: Autor (2023)

Tabela 9 – NF médio medido de cada condição

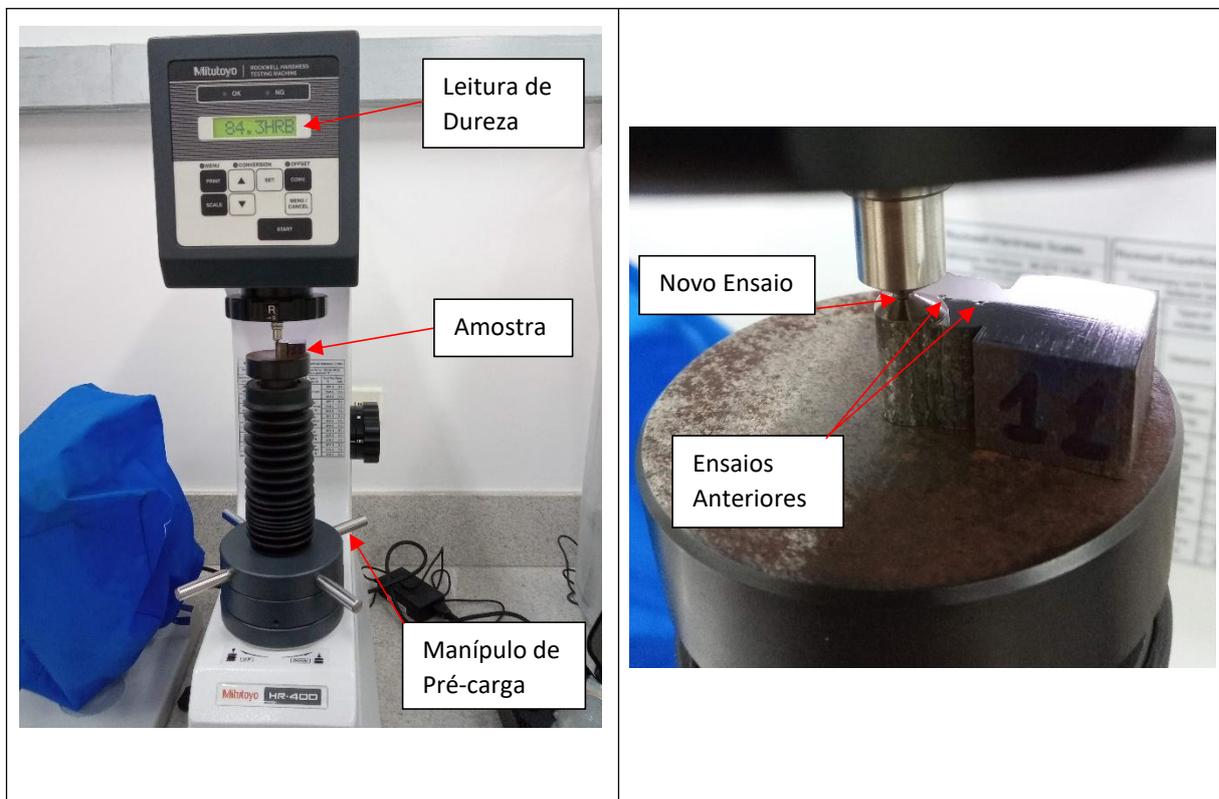
<b>Experimento</b>	<b>NF Médio</b>	<b>Experimento</b>	<b>NF Médio</b>	<b>Experimento</b>	<b>NF Médio</b>
<b>1</b>	8,08	<b>10</b>	5,93	<b>19</b>	7,20
<b>2</b>	7,24	<b>11</b>	6,21	<b>20</b>	6,44
<b>3</b>	8,14	<b>12</b>	7,76	<b>21</b>	5,83
<b>4</b>	7,17	<b>13</b>	7,65	<b>22</b>	6,94
<b>5</b>	8,22	<b>14</b>	8,17	<b>23</b>	5,72
<b>6</b>	6,78	<b>15</b>	7,11	<b>24</b>	7,21
<b>7</b>	6,89	<b>16</b>	6,27	<b>25</b>	6,75
<b>8</b>	7,85	<b>17</b>	6,75	<b>26</b>	8,26
<b>9</b>	8,26	<b>18</b>	6,66	<b>27</b>	7,30

Fonte: Autor (2023)

### 5.13 ENSAIO DE DUREZA ROCKWELL

O ensaio de dureza realizado na pesquisa foi o ensaio Rockwell-B (HRB). Nessa modalidade, o penetrador é uma esfera de aço de 1,5875 mm de diâmetro e a pré-carga é de 10 kgf. A carga utilizada na dureza HRB é de 100kgf. O Durômetro utilizado é um Mitutoyo HR - 400. A Figura 21 (a) contém o Durômetro utilizado e a Figura 21 (b) mostra com mais detalhes como as durezas foram sendo medidas.

Figura 21 – Ensaio de dureza: (a) visão geral do durômetro; (b) visão próxima da amostra sendo ensaiada



Fonte: Autor (2023)

Para realizar este ensaio, basta posicionar a amostra a ser ensaiada e girar o manípulo localizado na base da máquina até a pré-carga do ensaio. A partir desse momento, basta aguardar alguns segundos que o visor do equipamento fornece a leitura de dureza obtida.

Como já citado, serão três pontos de medição para cada amostra (ver Figura 20 (a)), em seguida, será calculado a respectiva média para cada amostra. Na

Tabela 10 contém todas as durezas HRB médias que irão para a análise no planejamento de experimentos.

Tabela 10 – Durezas médias HRB

<b>Experimento</b>	<b>HRB Médio</b>	<b>Experimento</b>	<b>HRB Médio</b>	<b>Experimento</b>	<b>HRB Médio</b>
<b>1</b>	86,82	<b>10</b>	84,02	<b>19</b>	85,28
<b>2</b>	86,27	<b>11</b>	84,77	<b>20</b>	85,09
<b>3</b>	86,54	<b>12</b>	86,33	<b>21</b>	84,02
<b>4</b>	85,28	<b>13</b>	86,25	<b>22</b>	85,57
<b>5</b>	86,13	<b>14</b>	86,87	<b>23</b>	84,01
<b>6</b>	85,58	<b>15</b>	86,27	<b>24</b>	86,03
<b>7</b>	85,83	<b>16</b>	84,93	<b>25</b>	85,97
<b>8</b>	86,59	<b>17</b>	85,40	<b>26</b>	86,28
<b>9</b>	86,73	<b>18</b>	85,57	<b>27</b>	85,33

Fonte: Autor (2023)

## 6 RESULTADOS E DISCUSSÕES

Nesta seção, serão apresentados os resultados dos dados coletados e mostrados anteriormente. Ao fornecer esses dados ao *software* Minitab®, o mesmo consegue realizar as análises que permitirão quantificar a influência de cada fator na resposta do que se está querendo analisar. Mas antes de iniciar as análises do planejamento experimental fatorial  $2^3$ , na seção a seguir, será apresentado o resultado do LP.

### 6.1 ENSAIO DE LÍQUIDO PENETRANTE

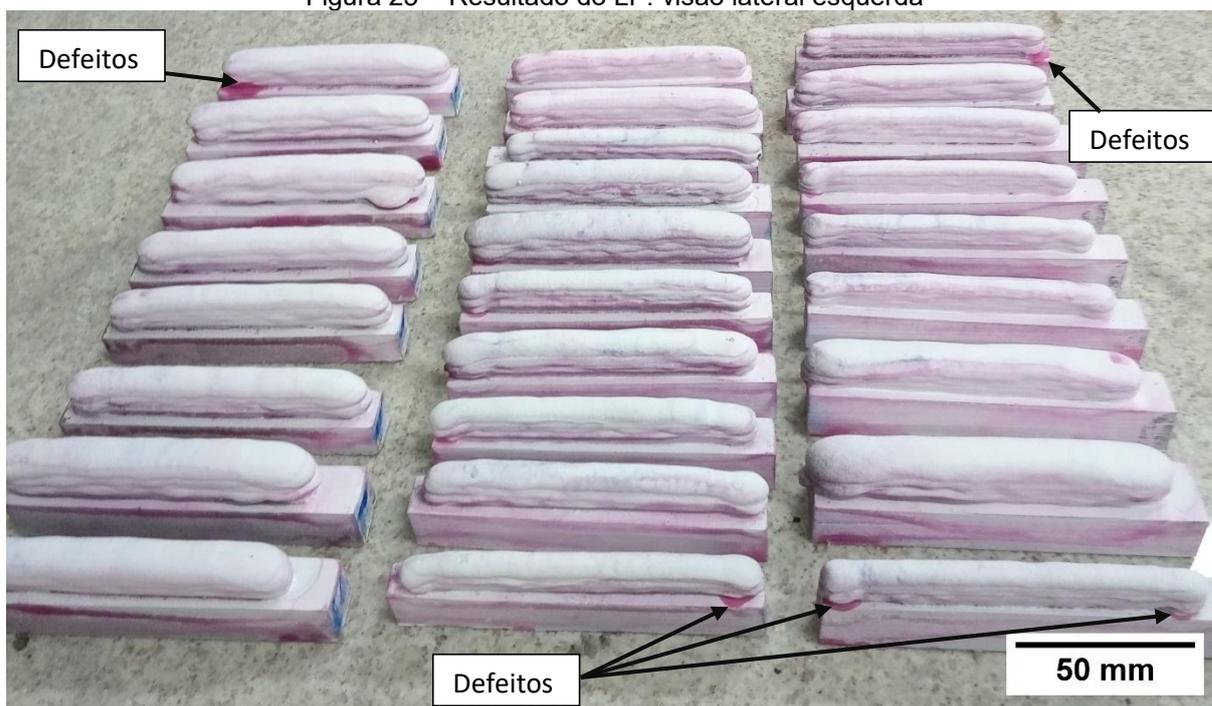
Objetivando verificar a presença de defeitos superficiais na deposição, observando as Figuras 22 e 23, constata-se que as únicas regiões que apresentaram defeitos foram as regiões onde ocorre a abertura do arco. Isso não representa problema, pois essas regiões são de descarte. Assim como na soldagem, a região de abertura de arco é descartada (MARQUES, MODENESI, BRACARENSE, 2011).

Figura 22 – Resultado do LP: visão lateral direita



Fonte: Autor (2023)

Figura 23 – Resultado do LP: visão lateral esquerda



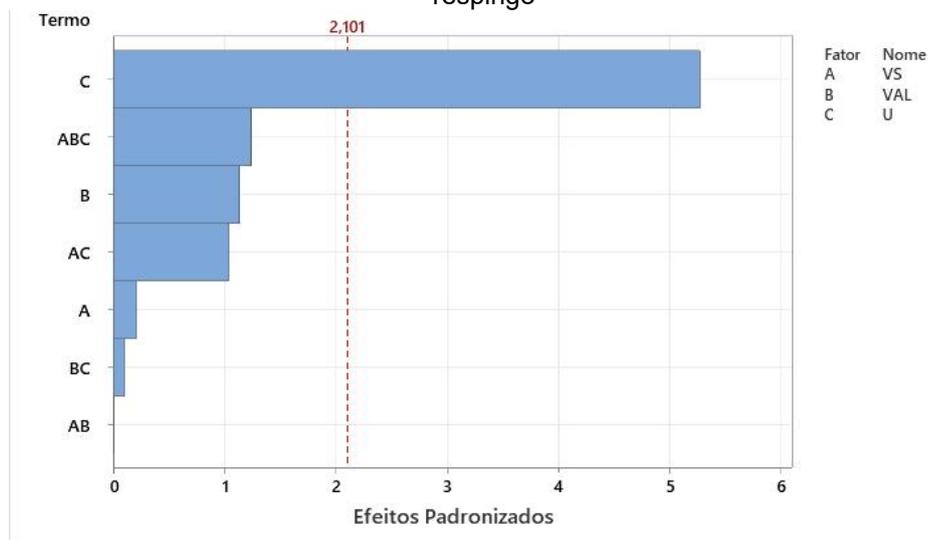
Fonte: Autor (2023)

É possível observar nas imagens anteriores que as demais regiões não apresentaram defeitos, mostrando como todas as condições trabalhadas no planejamento de experimentos ficaram isentas de defeitos superficiais.

## 6.2 INFLUÊNCIA DOS FATORES NO NÍVEL DE RESPINGOS

Saber quais parâmetros possuem relevância em relação ao nível de respingos de uma deposição metálica, é de suma importância para evitar perda de material e aparecimento de defeitos internos e externos na sobreposição de camadas. A Figura 24 mostra o gráfico de Pareto referente a influência de cada fator e suas interações nos níveis de respingos mensurados.

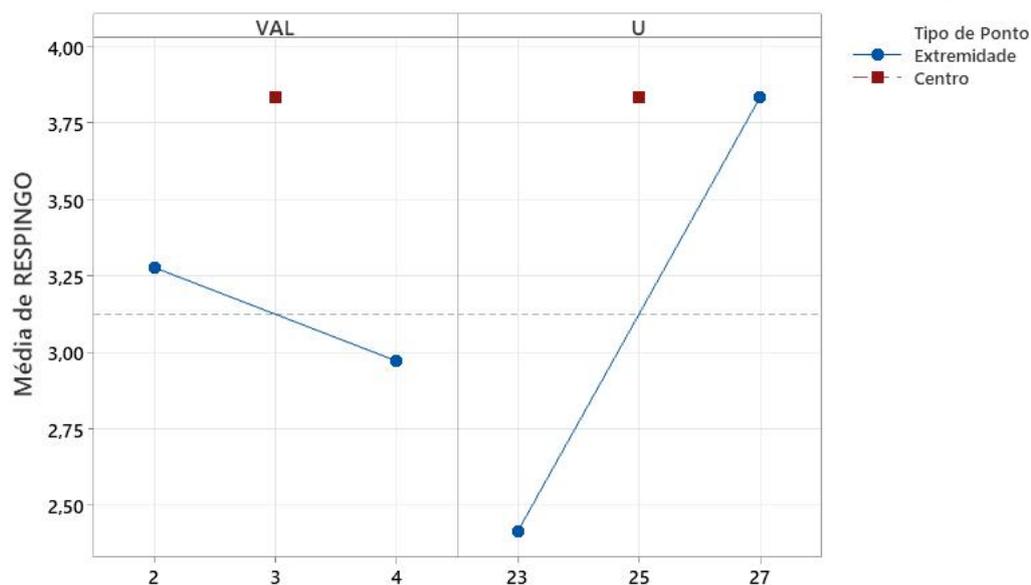
Figura 24 – Gráfico de Pareto da influência de cada fator e suas interações no nível de respingo



Fonte: Autor (2023)

A linha em vermelho corresponde ao valor de Logworth, é a referência que demarca quais fatores possuem mais relevância estatística em relação a resposta que se está analisando. Observando o gráfico, é verificado que a tensão é o fator que rege a quantidade de respingos na deposição via GMAW-P com controle sinérgico nas condições experimentais deste trabalho. Além disso, vale destacar que o gráfico mostra que a velocidade de alimentação (VAL) também possui certa influência no nível de respingos gerados, isso é esperado pois os controles da deposição metálica GMAW-P sinérgico são VAL e U. A tensão é responsável pela retenção da gota na ponta do arame, evitando, assim, o toque da gota formada com a poça de fusão antes do seu destacamento no pulso. Quando se diminui a tensão, a força que auxilia na retenção da gota na ponta do arame é diminuída e, conseqüentemente, há o toque na poça de fusão gerando os respingos (SCOTTI e PONOMAREV, 2014). Para visualizar a influência dos fatores principais, na Figura 25 contém o gráfico de efeitos principais para com os respingos sem a análise do fator velocidade de soldagem VS, pois o mesmo é irrelevante na análise. A influência do parâmetro é observada na inclinação da sua reta em relação aos níveis superior e inferior. Lembrando que o número atribuído segue o critério da Tabela 7 já mostrada na metodologia, onde 4 é a melhor condição e 1 é a pior condição.

Figura 25 – Gráfico do efeito individual de cada fator em relação ao nível de respingos

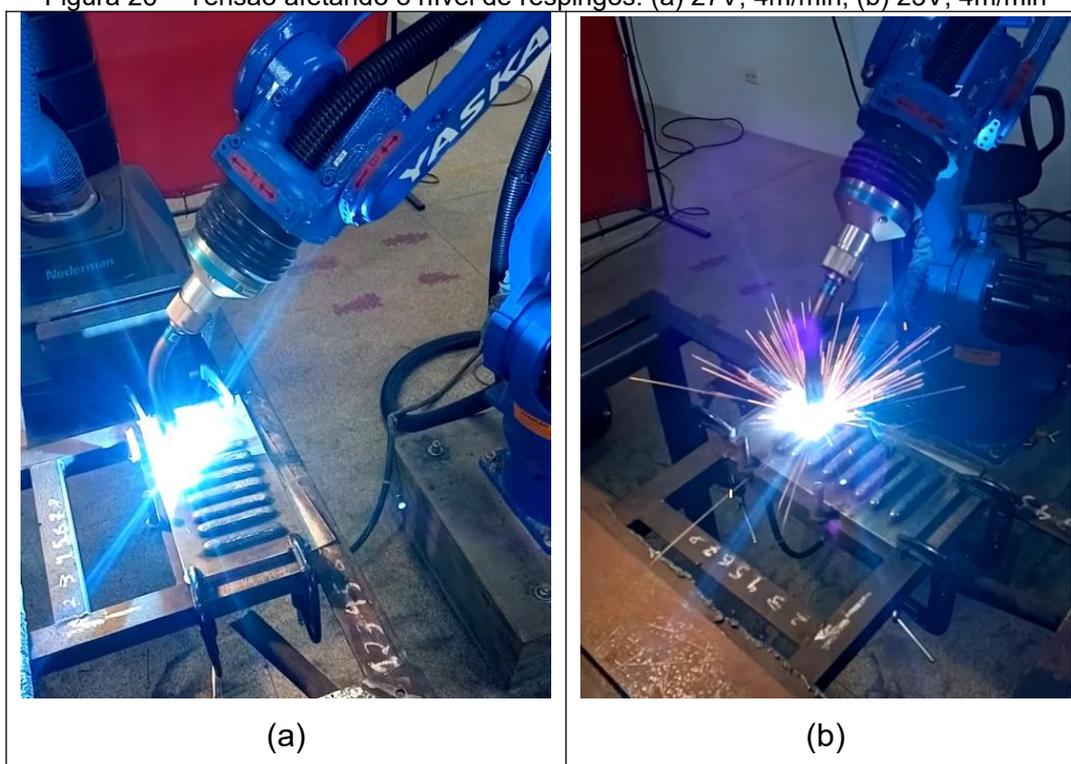


4 = Melhor Condição (sem respingos)

Fonte: Autor (2023)

Como é observado na figura anterior, corroborando com o gráfico de Pareto, apenas a variação dos níveis de tensão exerce influência significativa na resposta de respingos. Lembrando que por mais que a VAL não tenha comparação com a U em relação as qualificações feitas em laboratório, é importante manter na análise pois o efeito de respingos é uma combinação desses dois fatores. Para se ter uma ideia visual de como a tensão muda o comportamento dos respingos. Na Figura 26 contém apenas a mudança de tensão de 27V para 23V, para a mesma condição de VAL e U. Como é visto nas análises anteriores, a tensão de referência U é o fator governante do nível de respingos observado no estudo.

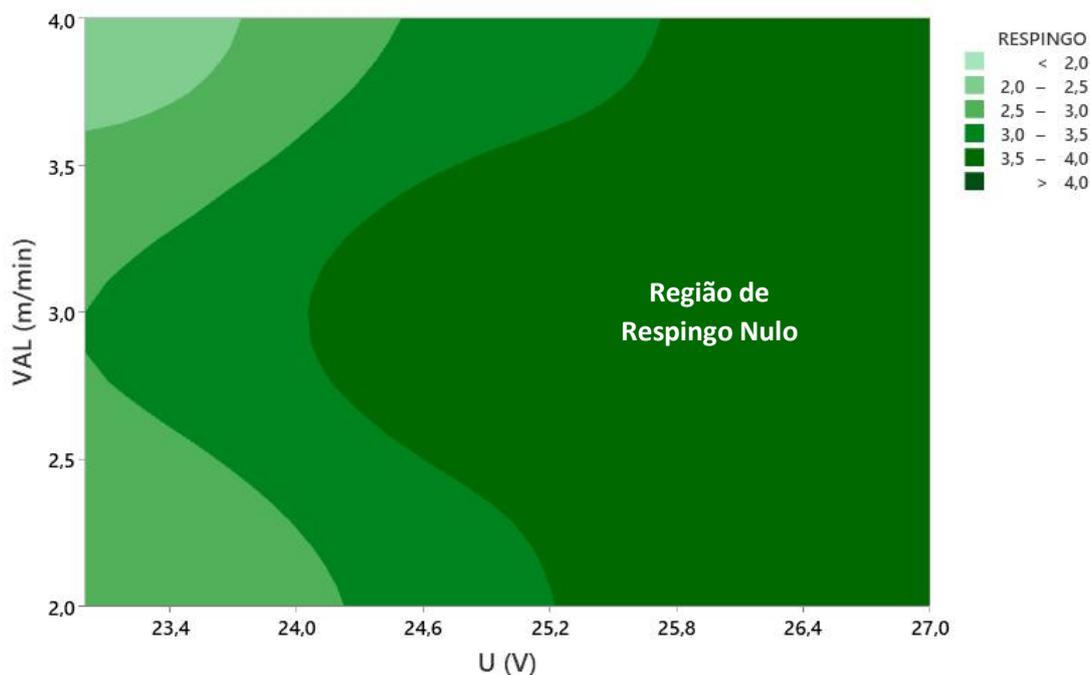
Figura 26 – Tensão afetando o nível de respingos: (a) 27V, 4m/min; (b) 23V, 4m/min



Fonte: Autor (2023)

A Figura 27 contém o gráfico de contorno do nível de respingos em relação a tensão e velocidade de alimentação. Com esse gráfico consegue-se ter uma visão mais ampla de como os dois fatores, mais relevantes para o nível de respingos, se correlacionam. É possível constatar que a velocidade de alimentação de 3 m/min consegue cobrir a maior faixa de tensão para garantir uma deposição isenta de respingos. Isso é importante de se observar, uma vez que as recomendações do equipamento para ambos níveis de VAL, ficavam muito próximos de 25V. Outro ponto que vale observar na Figura 27, é que com níveis de VAL baixos, menores níveis de tensão são necessários para que não haja respingos, ou seja, para que a transferência metálica seja pulsada sem o contato da gota com a poça de fusão antes do seu destacamento. Na tabela 11 contém o resumo de como cada fator atua no nível de respingos.

Figura 27 – Gráfico de contorno do nível de respingos em relação a VAL (m/min) e U (V)



Fonte: Autor (2023)

Tabela 11 – Resumo da influência dos fatores no nível de respingos

Fator	Influência ao variar do Nível Inferior (-) para o Nível Superior (+)
(A): VS	Não exerce influência
(B): VAL	Exerce pouca influência no nível de respingos
(C): U	É o fator que controla o nível de respingos

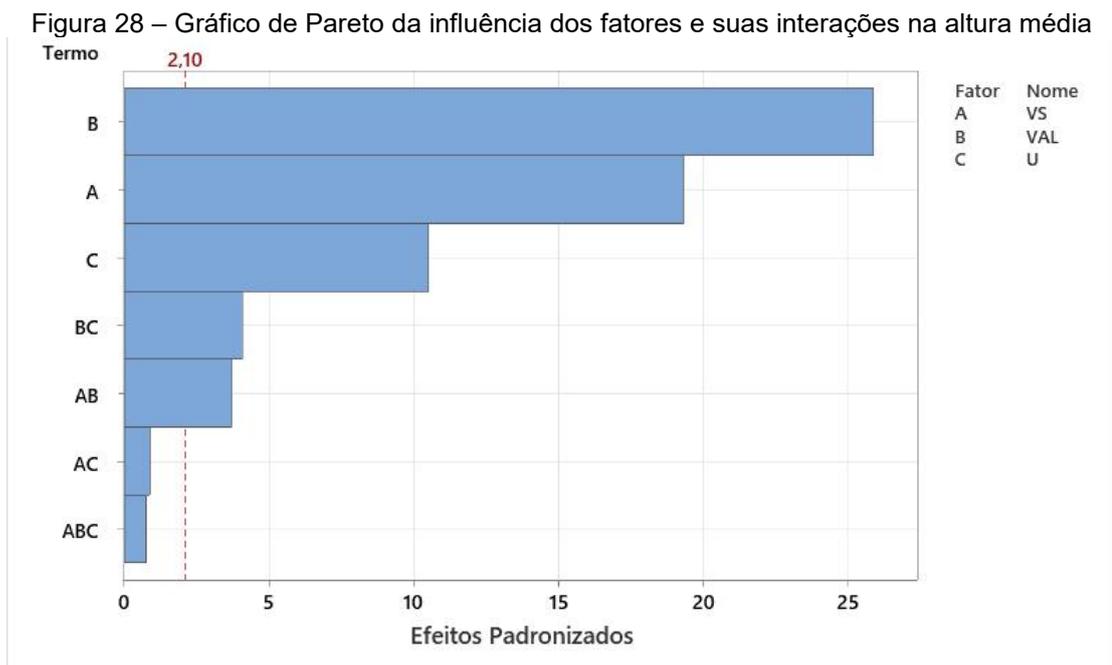
Fonte: Autor (2023)

### 6.3 INFLUÊNCIA DOS FATORES NA GEOMETRIA DA DEPOSIÇÃO

No processo MADA, os fatores de geometria da deposição são um dos mais importantes para o sucesso do processo. Uma vez que, como citado anteriormente, as peças fabricadas com MADA via GMAW-P necessitam ser *near net shape*. Logo, ter conhecimento de como os fatores irão influenciar na espessura e altura de cada camada é de suma importância.

### 6.3.1 Influência dos fatores na altura média

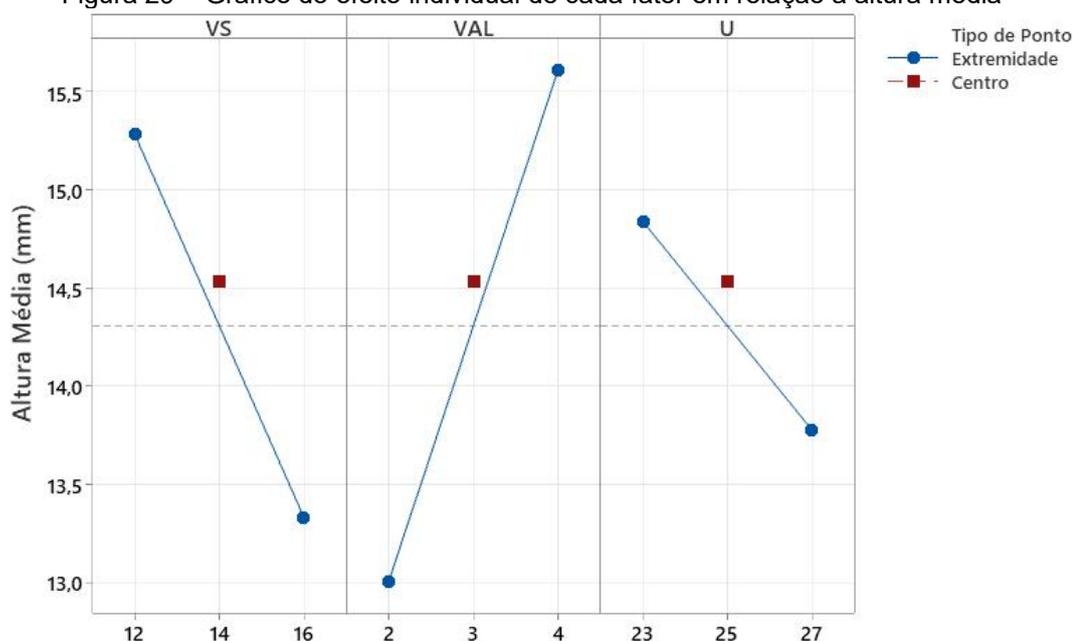
Antes de prosseguir com a análise, vale lembrar que as medições de altura são relativas a seis camadas de deposição. Na Figura 28, observa-se o gráfico de Pareto dos efeitos e suas interações em relação à altura média das paredes impressas.



Fonte: Autor (2023)

Os fatores A, B e C, individualmente, são os fatores de maior relevância. Analisar suas interações se torna não recomendável (NETO, SCARMINIO, BRUNS, 2010). Essa ordem era esperada, uma vez que tanto a velocidade de soldagem (A), quanto a velocidade de alimentação (B) afetam a quantidade de material depositado por camada. Não obstante, a tensão (C) também possui influência, pois altera a quantidade de energia imposta no processo. Para ampliar a compreensão e quantificação da influência desses fatores, na Figura 29 contém o gráfico dos efeitos principais que analisa a resposta do respingo em relação a cada fator separadamente.

Figura 29 – Gráfico do efeito individual de cada fator em relação à altura média



Fonte: Autor (2023)

O fator VS-(Velocidade de Soldagem) ao variar do seu nível inferior ao superior compreendeu uma variação de aproximadamente 2 mm em decréscimo, com o ponto central de 14,54mm. O fator VAL-(Velocidade de Alimentação) evidencia a maior influência, partindo de 13 mm de altura no seu nível inferior (2 m/min) e atingindo a maior cota de altura com valor próximo a 16 mm no seu nível superior. Em relação ao fator U-(Tensão), observamos a menor influência pois ao se variar do seu nível inferior (23V) para o superior (27V) os experimentos registraram um decréscimo de aproximadamente 0,9 mm. Por fim, obtivemos da análise a Equação 3 de regressão que relaciona os fatores e o ponto central.

$$\text{Altura Média (mm)} = 26,1 - 1,20*(VS) + 1,86*(VAL) - 0,515*(U) + 0,144*(VS*VAL) + 0,0399*(VS*U) + 0,031*(VAL*U) - 0,0095*(VS*VAL*U) + 0,230*(Ponto Central)$$

[3]

Fonte: Autor (2023)

Esse modelo possui um desvio de S= 0,25 (mm), um  $R^2 = 98,50\%$  onde  $R^2(\text{Ajuste}) = 97,84\%$  e  $R^2(\text{predição}) = 96,63\%$ . Ponto Central = 14,54 mm. Porém, como já visualizado na Figura 28, as interações AC e ABC não possuem relevância

estatística no modelo pois ficaram abaixo da linha de Logworth. Refazendo o modelo de regressão, desconsiderando AC e ABC, temos a Equação 4.

$$\text{Altura Média (mm)} = 12,17 - 0,2050*(\mathbf{VS}) + 5,202*(\mathbf{VAL}) + 0,0433*(\mathbf{U}) - 0,0942*(\mathbf{VS*VAL}) - 0,1030*(\mathbf{VAL*U}) + 0,230*(\mathbf{Ponto Central})$$

[4]

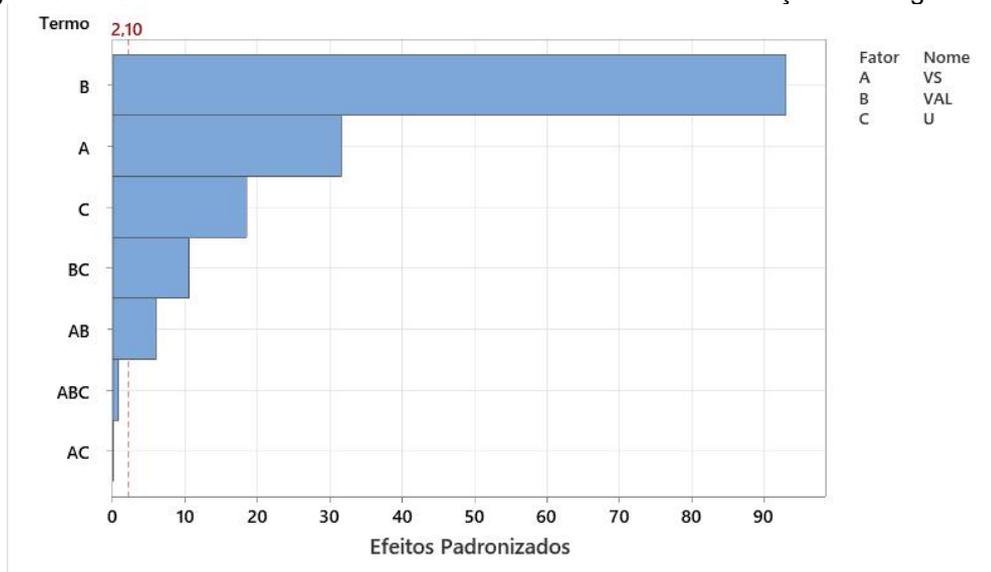
Fonte: Autor (2023)

Esse novo modelo, mais ajustado, possui um desvio de  $S = 0,24$  (mm), um  $R^2 = 98,39\%$  onde  $R^2(\text{Ajuste}) = 97,91\%$  e  $R^2(\text{predição}) = 97,10\%$ .

### 6.3.2 Influência dos fatores na largura média

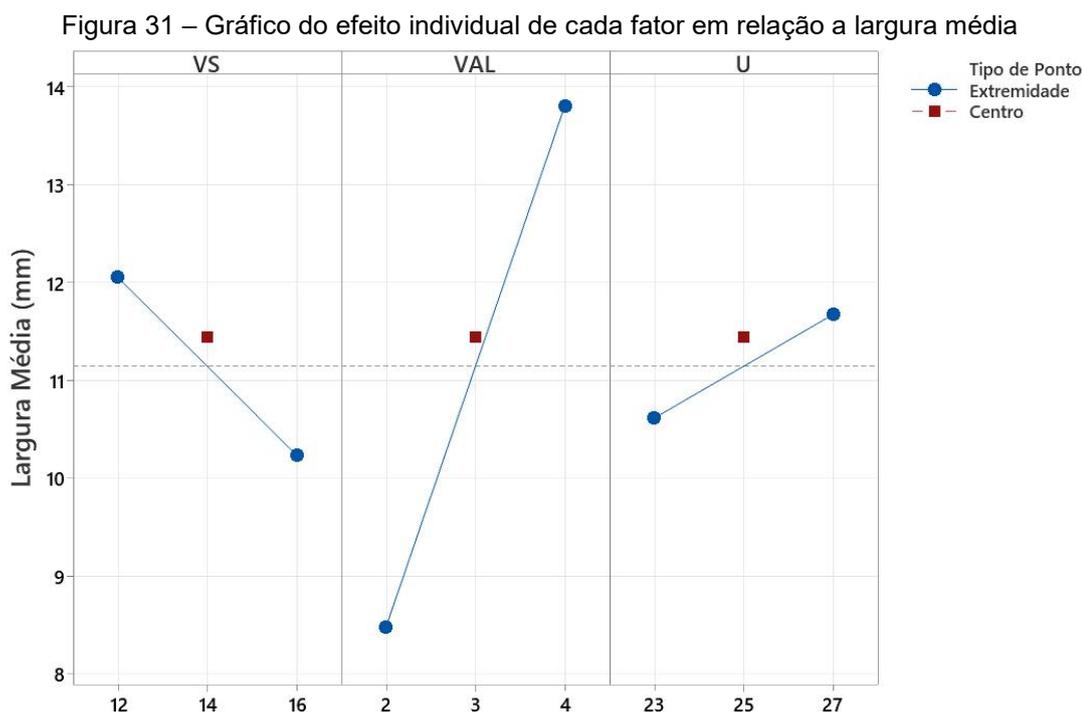
A largura é um parâmetro até mais relevante em certo grau do que a altura que cada camada gera, uma vez que ela é a determinante da espessura da parede que o processo MADA irá gerar. Essa resposta é importante de se prever para que a parametrização consiga gerar espessura suficiente destinada para a remoção por usinagem no acabamento da peça (DINIZ, MARCONDES, COPPINI, 2014). Na Figura 30 contém o gráfico de Pareto da influência de cada parâmetro e suas interações na largura média de cada experimento.

Figura 30 – Gráfico de Pareto da influência dos fatores e suas interações na largura média



Fonte: Autor (2023)

Acompanhando a tendência observada na altura média, os fatores A, B e C são os de maior relevância nessa resposta, isso era esperado. Uma vez observados que os fatores principais são os mais relevantes e suas interações exercem influência mais amena, podemos apenas verificar o gráfico de efeitos principais para largura média contido na Figura 31.



Fonte: Autor (2023)

O fator VS-(Velocidade de Soldagem) ao variar do seu nível inferior ao superior compreendeu uma variação de largura de aproximadamente 1,8 mm em decréscimo, com o ponto central experimental de 11,44 mm. O fator VA-(Velocidade de Alimentação) evidencia a maior influência na largura. Isso se deve pelo fato de que mais material está sendo depositado ao longo da camada. Partindo de 8,6 mm de largura no seu nível inferior (2 m/min) e atingindo a maior cota de largura com valor próximo a 13,9 mm no seu nível superior, observando uma variação de aproximadamente 5,3 mm entre seus níveis, número bastante expressivo.

Em relação ao fator U-(Tensão), assim como na altura média, observamos a menor influência pois ao se variar do seu nível inferior (23V) para o superior (27V) os experimentos registraram um acréscimo de largura de aproximadamente 1 mm. Por

fim, obtivemos da análise a Equação 5 de regressão que relaciona os fatores e o ponto central.

$$\begin{aligned} \text{Largura Média (mm)} = & 4,76 + 0,222*(\mathbf{VS}) + 2,16*(\mathbf{VAL}) + 0,047*(\mathbf{U}) - \\ & 0,234*(\mathbf{VS*VAL}) - 0,0168*(\mathbf{VS*U}) + 0,068*(\mathbf{VAL*U}) + 0,00594*(\mathbf{VS*VAL*U}) + \\ & 0,2949*(\mathbf{Ponto Central}) \end{aligned} \quad [5]$$

Fonte: Autor (2023)

Esse modelo possui um desvio de  $S = 0,14$  (mm), um  $R^2 = 99,82\%$  onde  $R^2(\text{Ajuste}) = 99,74\%$  e  $R^2(\text{predição}) = 99,60\%$ . Ponto Central = 11,44 (mm). Porém, como já visualizado na Figura 30, as interações AC e ABC não possuem relevância estatística no modelo pois ficaram abaixo da linha de Logworth. Refazendo o modelo de regressão, desconsiderando AC e ABC, temos a Equação 6.

$$\begin{aligned} \text{Largura Média (mm)} = & 10,64 - 0,1978*(\mathbf{VS}) + 0,082*(\mathbf{VAL}) - 0,1886*(\mathbf{U}) \\ & - 0,0853*(\mathbf{VS*VAL}) + 0,1510*(\mathbf{VAL*U}) + 0,2949*(\mathbf{Ponto Central}) \end{aligned} \quad [6]$$

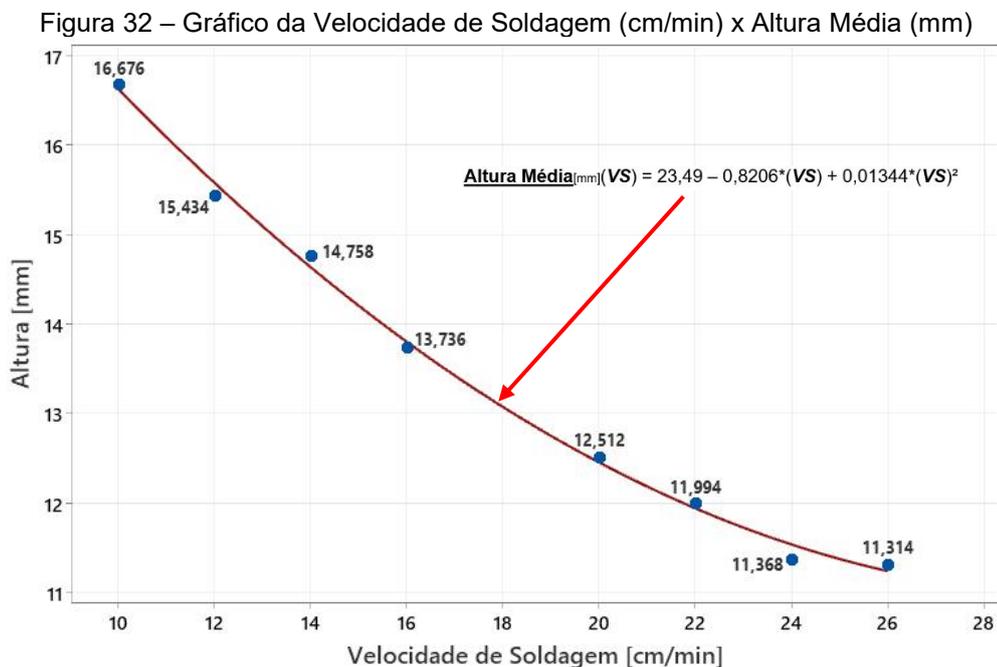
Fonte: Autor (2023)

Esse novo modelo, mais ajustado, possui um desvio de  $S = 0,13$  (mm), um  $R^2 = 99,82\%$  onde  $R^2(\text{Ajuste}) = 99,76\%$  e  $R^2(\text{predição}) = 99,67\%$ .

### 6.3.3 Estudo isolado da influência da velocidade de soldagem na geometria

Como é conhecido e observado que o fator Velocidade de Soldagem (Fator A) exerce grande influência na geometria caso sua variação seja grande, num processo industrial, tendo os parâmetros de deposição metálica bem estabelecidos e determinados, mudar a geometria da deposição apenas variando a VS, se mostra como uma importante estratégia para facilitar o uso da MADA via GMAW-P. Para estudar melhor a resposta geométrica desse parâmetro, fixou-se a velocidade de alimentação em 3 m/min e a tensão em 25V. Esses parâmetros constituíram uma das melhores respostas geométricas e de respingos de todo estudo. A aquisição das

medidas nesta etapa foi feita da mesma forma, ou seja, consistindo em 5 pontos e aferindo-se o valor médio tanto da altura quanto da largura, ver Figura 14. Lembrando que a altura é relativa a seis camadas depositadas. A variação da velocidade de soldagem estudada foi de 10 cm/min até 26 cm/min. O limite inferior foi definido por excessiva distorção resultante da elevada quantidade de material depositada em função do baixo deslocamento da tocha. O limite superior foi definido no trabalho do Sopelsa (2013), onde o mesmo utilizou uma velocidade de soldagem de 26 cm/min. Na Figura 32, está plotado o gráfico da altura média em função da velocidade de soldagem.



Fonte: Autor (2023)

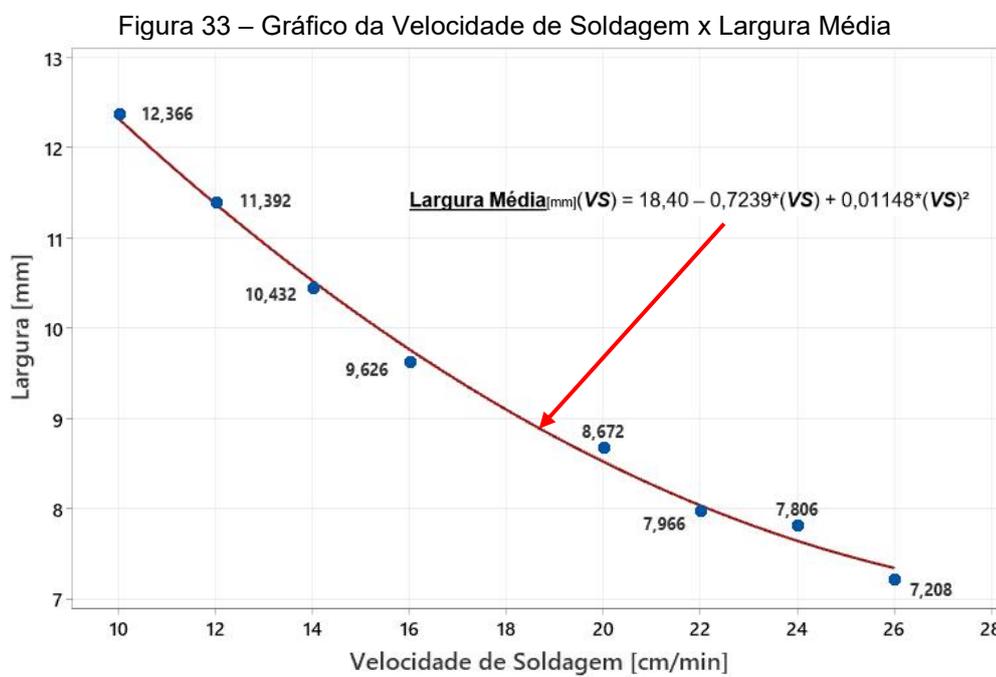
Para a distribuição de dados do gráfico anterior, a Equação 7 mostra a regressão polinomial referente a curva de ajuste.

$$\text{Altura Média}_{[mm]}(VS) = 23,49 - 0,8206 \cdot (VS) + 0,01344 \cdot (VS)^2 \quad [7]$$

Fonte: Autor (2023)

Esse modelo possui um desvio de  $S = 0,13$  (mm), um  $R^2 = 99,71\%$  onde  $R^2(\text{Ajuste}) = 99,59\%$ .

Na Figura 33 está plotado o gráfico da largura média em função velocidade de soldagem, bem como a curva do modelo de regressão polinomial para se obter uma equação empírica destes dados



Fonte: Autor (2023)

Para a distribuição de dados do gráfico anterior, a Equação 8 mostra a regressão polinomial referente a curva de ajuste.

$$\underline{Largura\ Média}_{[mm]}(VS) = 18,40 - 0,7239*(VS) + 0,01148*(VS)^2 \quad [8]$$

Fonte: Autor (2023)

Esse modelo possui um desvio de  $S = 0,14$  (mm), um  $R^2 = 99,57\%$  onde  $R^2(\text{Ajuste}) = 99,40\%$ .

Constata-se que a previsibilidade geométrica da deposição apenas controlando a velocidade da tocha é bastante satisfatória. Permitindo ao operador do processo saber, com boa margem, quantos passes e qual será a espessura resultante da sua peça fabricada por MADA via GMAW-P apenas controlando-se esse parâmetro, uma vez que todos os outros estão bem estabelecidos e afetam

diretamente na transferência metálica. Obviamente, vale ressaltar que caso se queira trabalhar com valores de VS fora do intervalo estudado, deve-se fazer as compensações de VAL e U para compensar esse novo valor de VS, uma vez que distorções geométricas serão observadas por um aumento ou diminuição excessivo de VS sem a devida compensação na taxa de deposição do material. Nas tabelas 12 e 13 contêm o resumo de como cada fator atua na altura e largura respectivamente.

Tabela 12 – Resumo da influência dos fatores na altura

<b>Fator</b>	<b>Influência ao variar do Nível Inferior (-) para o Nível Superior (+)</b>
(A): VS	Diminuição na altura de cada camada
(B): VAL	Aumento na altura de cada camada
(C): U	Leve diminuição na altura de cada camada

Fonte: Autor (2023)

Tabela 13 – Resumo da influência dos fatores na largura

<b>Fator</b>	<b>Influência ao variar do Nível Inferior (-) para o Nível Superior (+)</b>
(A): VS	Diminuição na largura de cada camada
(B): VAL	Aumento na largura de cada camada
(C): U	Leve aumento na largura de cada camada

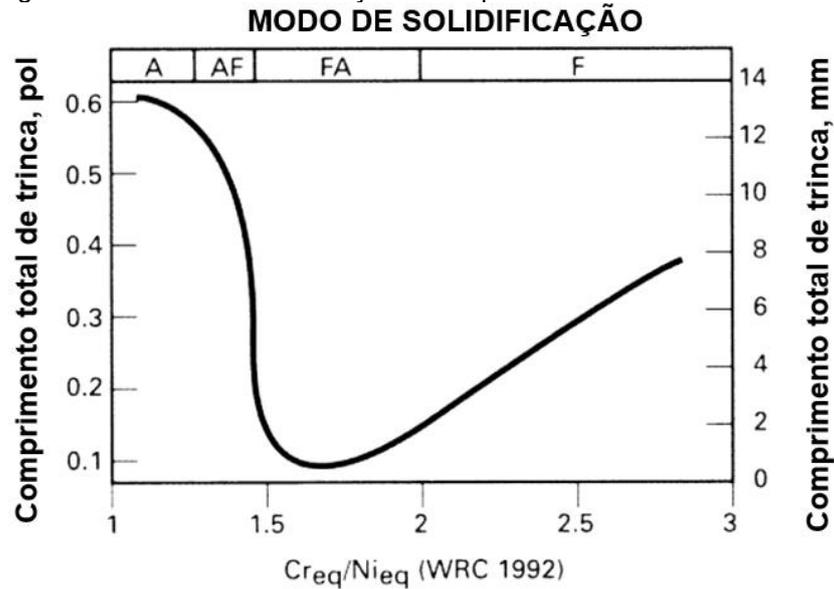
Fonte: Autor (2023)

#### 6.4 INFLUÊNCIA DOS FATORES NO NÚMERO DE FERRITA (NF)

Avaliar o número de ferrita nos aços inoxidáveis austeníticos é de suma importância. Em estudos como o de O'Brien & Guzman (1998) mostraram que uma solidificação do tipo Ferrita-Austenita (FA) garantem um menor comprimento de trinca a quente, caso a mesma seja nucleada, e melhores propriedades mecânicas conferido pela formação de baixas frações de ferrita (RAJASEKHAR et al., 1997; SOMANI e LALWANI, 2020). A Figura 34 mostra como pode ser quantificada essa relação de número de ferrita com comprimento de trinca a quente. A Figura 35 mostra o diagrama WRC de 1992 que correlaciona o cromo equivalente e o níquel equivalente com as curvas de número de ferrita. Esses gráficos serão importantes para interpretar se o parâmetro está sendo deletério ou contribuidor em relação ao NF. Os teores de ferrita adequados no material, contribuem, durante a solidificação, na solubilização de compostos químicos como o enxofre e o fósforo. Esses

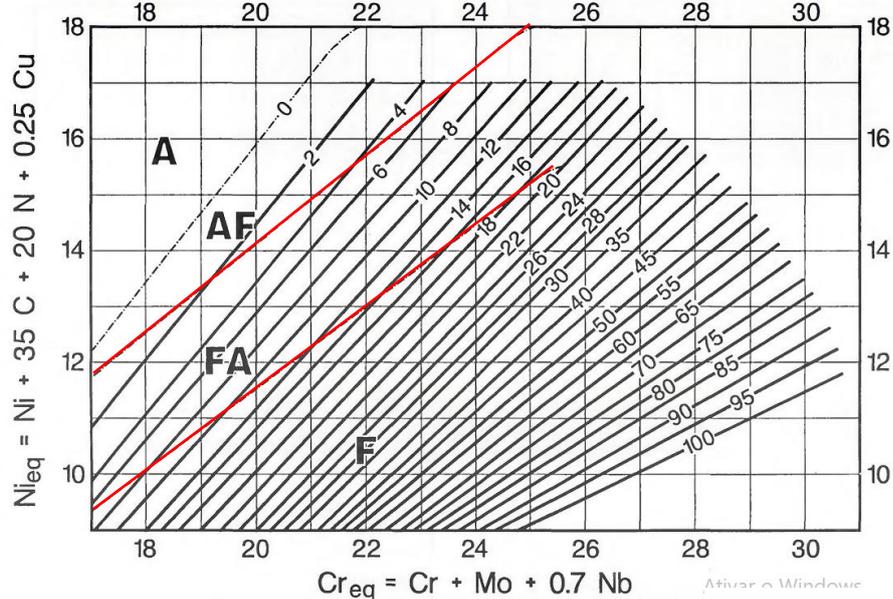
compostos, por possuírem ponto de fusão muito baixos, fazem com que determinadas partes do material solidificando permaneçam numa fase líquida enquanto outras partes já estão em níveis mais sólidos. Essa diferença de fases ocasiona, devido as próprias contrações térmicas do resfriamento, na provável separação e nucleação de trincas a quente nessas regiões onde se localizam essas porções mais fluidas. (RAJASEKHAR et al., 1997; SOMANI e LALWANI, 2020).

Figura 34 – Modo de solidificação x Comprimento total de trinca



Fonte: Adaptado de O'Brien & Guzman (1998)

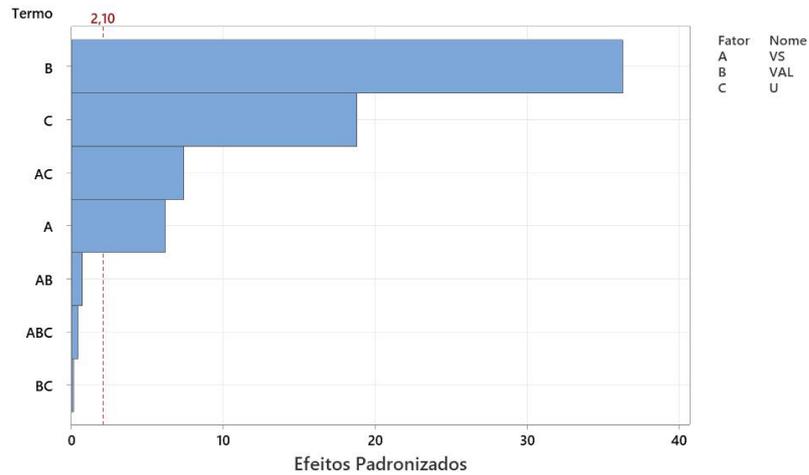
Figura 35 – Diagrama WRC - 1992 com marcações dos limites da solidificação FA



Fonte: Adaptado de Kotecki & Siewer (1992)

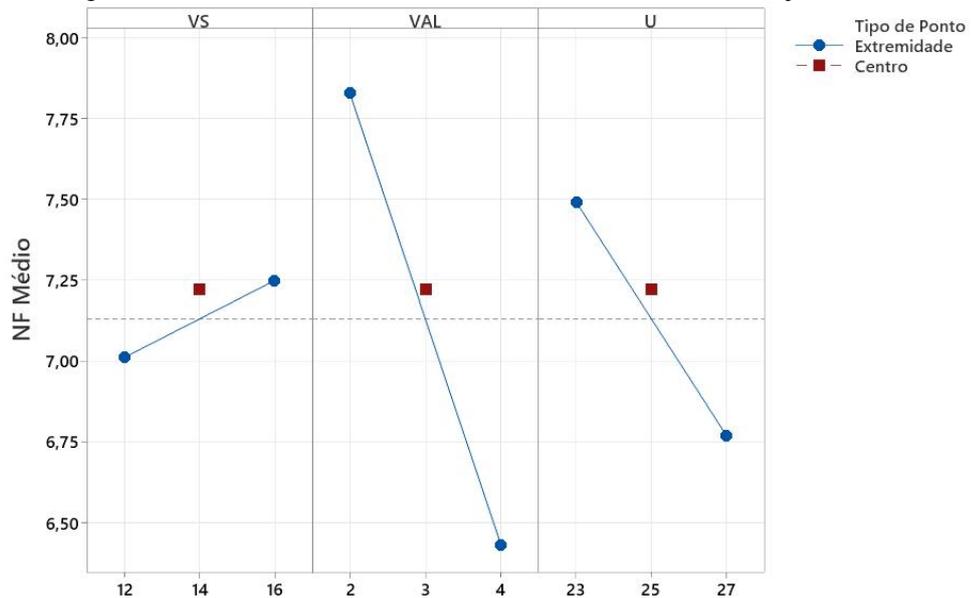
Para iniciar o estudo das influências dos fatores em função do Número de Ferrita (NF), está ilustrado, na Figura 36, o gráfico de Pareto dos efeitos para o NF médio. Lembrando que a forma como o NF médio foi adquirida está na metodologia.

Figura 36 – Gráfico de Pareto da influência dos fatores e suas interações no NF médio



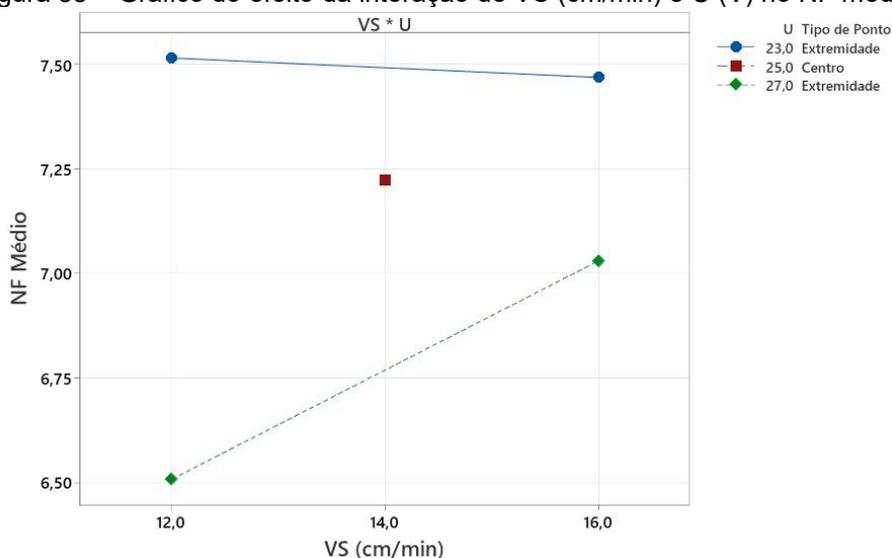
Verificando o gráfico anterior, constata-se que os fatores de maior influência para o NF médio são, respectivamente, fator B, fator C e a interação entre os fatores A e C. Na Figura 37, está contido o gráfico da influência individual que cada fator exerce no NF.

Figura 37 – Gráfico de efeito individual de cada fator em relação ao NF



Com relação ao fator VS, observa-se pouca influência entre seus níveis, um acréscimo do NF de aproximadamente 0,25. Todavia, o fator VAL possui a maior influência, obtendo um decréscimo de aproximadamente 1,4. Para o fator U, temos a condição intermediária, nele observa-se um decréscimo de aproximadamente 0,4 no NF. Como observado no gráfico de Pareto, a interação dos fatores A e C possui relevância na influência em relação a NF, as demais interações abaixo da linha de Logworth (linha vermelha) possuem baixa significância estatística. Na Figura 38 encontra-se o gráfico de interação desses dois fatores.

Figura 38 – Gráfico do efeito da interação de VS (cm/min) e U (V) no NF médio

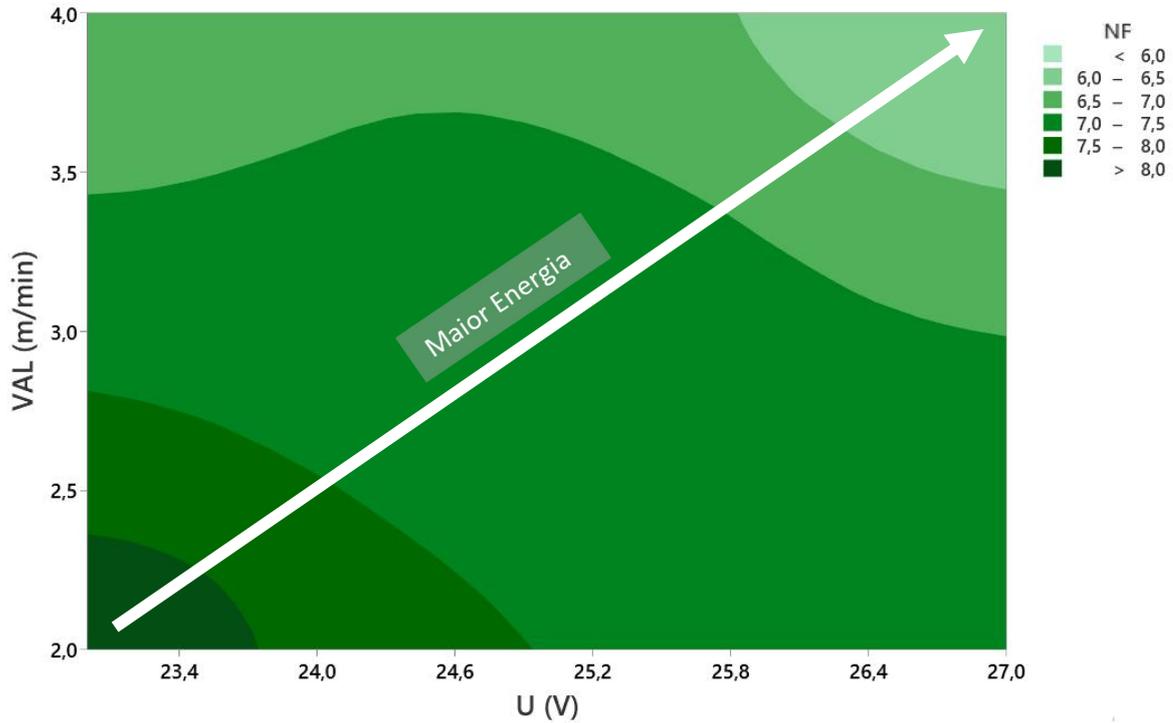


Fonte: Autor (2023)

É possível observar que quando a tensão está em 23V, a variação do VS não teve significância nas medições do NF. Porém, quando a tensão é de 27V, mediu-se uma variação de 0,53. Indicando que a velocidade de soldagem só se torna fator preponderante na resposta do NF quando se trabalha com maior aporte energético no processo de transferência metálica.

Para observar essa hipótese, utilizando os fatores que influenciam a transferência metálica do GMAW-P Sinérgico, construiu-se um gráfico de contorno com o NF em função da Velocidade de Alimentação (Fator B) e da Tensão (Fator C). Este gráfico está contido na Figura 39.

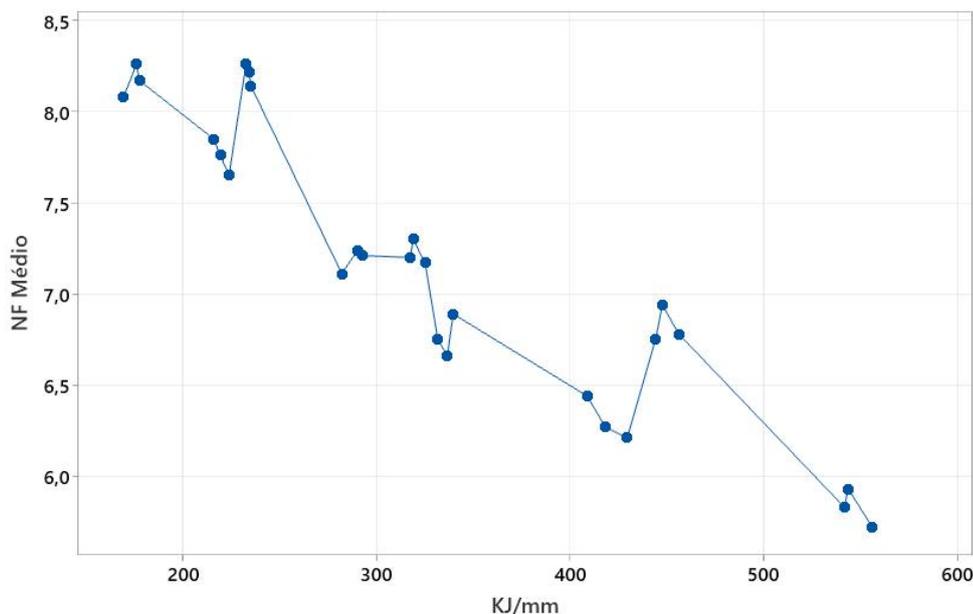
Figura 39 – Gráfico de contorno NF médio em relação a VAL (m/min) e U (V)



Fonte: Autor (2023)

Como é possível visualizar na figura anterior, a medida em que o processo de transferência metálica vai recebendo mais energia, o número de ferrita tende a cair consideravelmente. Isso pode ser explicado pelo fato de que ao se obter um maior aporte energético na poça de fusão, o material, durante a solidificação, permanece em maiores níveis de temperatura por mais tempo, com isso favorecendo os menores teores de ferrita retidos na solução sólida. Para confirmar de fato essa tendência, a Figura 40 contém o gráfico de dispersão que relaciona o NF médio com a energia da transferência metálica em KJ/mm obtida do sistema de monitoramento mostrado anteriormente.

Figura 40 – NF médio x Energia imposta em quilojoule por milímetro



Fonte: Autor (2023)

A partir dos resultados obtidos, pode-se inferir que há uma tendência de diminuição da ferrita com o aumento da energia. Para o presente estudo, conclui-se que para garantir os maiores valores de ferrita possível, deve-se evitar parâmetros mantenham os níveis médios abaixo de 7 para que se tenha uma predominância de solidificação FA e, conseqüentemente, uma menor incidência de trinca a quente. Por fim, obtivemos da análise a Equação 9 de regressão que relaciona os fatores e o ponto central em relação ao NF médio.

$$\text{NF Médio (mm)} = 27,20 - 0,967*(\text{VS}) - 1,30*(\text{VAL}) - 0,763*(\text{U}) + 0,045*(\text{VS*VAL}) + 0,0419*(\text{VS*U}) + 0,0279*(\text{VAL*U}) - 0,00208*(\text{VS*VAL*U}) + 0,0933*(\text{Ponto Central})$$

[9]

Fonte: Autor (2023)

Esse modelo possui um desvio de  $S = 0,09$ , um  $R^2 = 98,99\%$  onde  $R^2(\text{Ajuste}) = 98,54\%$  e  $R^2(\text{predição}) = 97,73\%$ . Ponto Central = 7,22. Porém, como já visualizado na Figura 36, as interações AB, BC e ABC não possuem relevância estatística no modelo pois ficaram abaixo da linha de Logworth. Refazendo o modelo de regressão, desconsiderando AB, BC e ABC, temos a Equação 10.

$$\text{NF Médio(mm)} = 25,38 - 0,831*(\text{VS}) - 0,6992*(\text{VAL}) - 0,6796*(\text{U}) + 0,03563*(\text{VS*U}) + 0,0933*(\text{Ponto Central})$$

[10]

Fonte: Autor (2023)

Esse novo modelo, mais ajustado, possui um desvio de  $S = 0,09$ , um  $R^2 = 98,95\%$  onde  $R^2(\text{Ajuste}) = 98,70\%$  e  $R^2(\text{predição}) = 98,29\%$ . Na tabela 14 contém o resumo de como cada fator atua no NF.

Tabela 14 – Resumo da influência dos fatores no Número de Ferrita (NF)

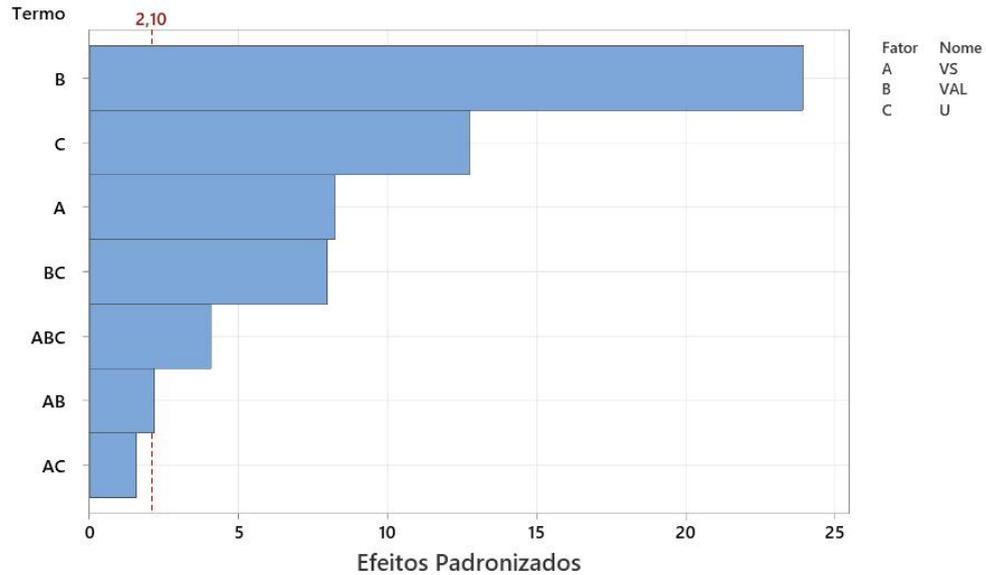
Fator	Influência ao variar do Nível Inferior (-) para o Nível Superior (+)
(A): VS	Leve aumento do número de ferrita
(B): VAL	Diminuição do número de ferrita
(C): U	Diminuição do número de ferrita

Fonte: Autor (2023)

## 6.5 INFLUÊNCIA DOS FATORES NA DUREZA MÉDIA

A dureza é um importante indicativo de propriedade mecânica de um material. Materiais mais duros apresentam menos deformação para uma determinada tensão. Porém, dureza em excessividade pode fragilizar o material. A fusão por arco elétrico envolve elevada carga térmica, e dependendo do gradiente térmico envolvido durante a solidificação do metal, sua dureza média pode variar. Entender como os parâmetros influenciam nessa mudança é de suma importância para entender qual é o impacto da parametrização em relação a tendência da dureza média na MADA. Na Figura 41 está o gráfico de Pareto dos efeitos em relação a dureza média (HRB).

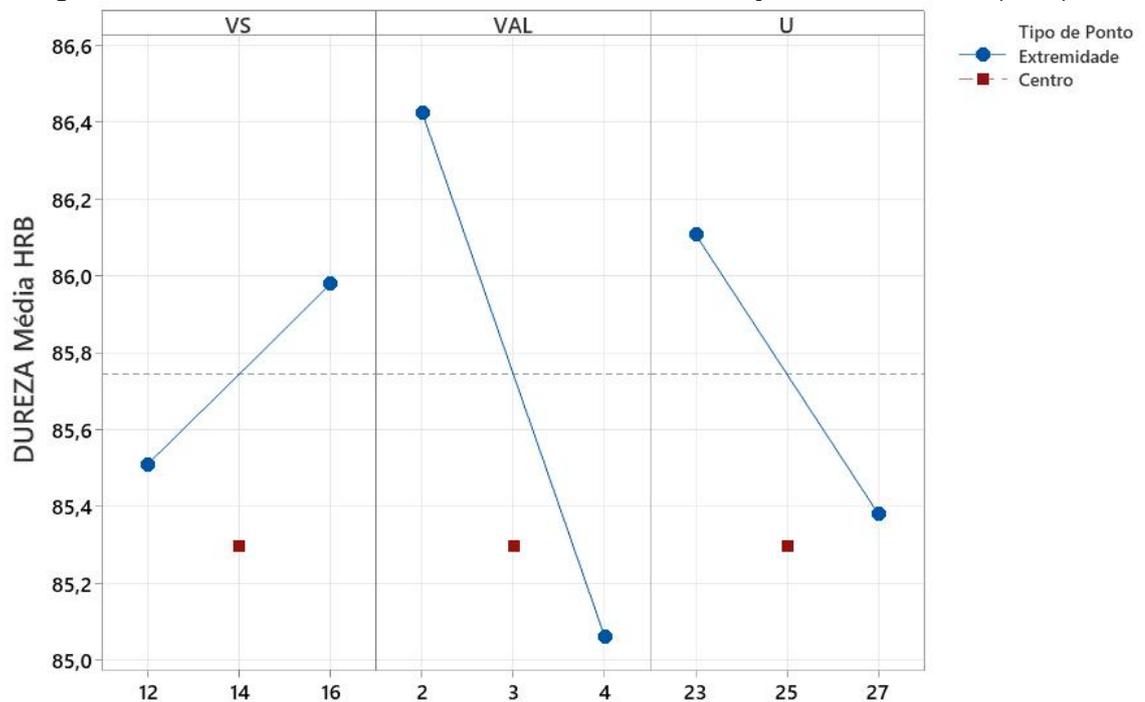
Figura 41 – Gráfico de Pareto influência dos fatores e suas interações na dureza média



Fonte: Autor (2023)

Observa-se, da figura anterior, que os fatores B, C e A são os dominantes na resposta de dureza média. Não obstante, as interações dos fatores BC, ABC e AB também evidenciam força de influência na resposta. Na Figura 42 está o gráfico de efeitos principais.

Figura 42 – Gráfico de efeito individual de cada fator em relação a dureza média (HRB)

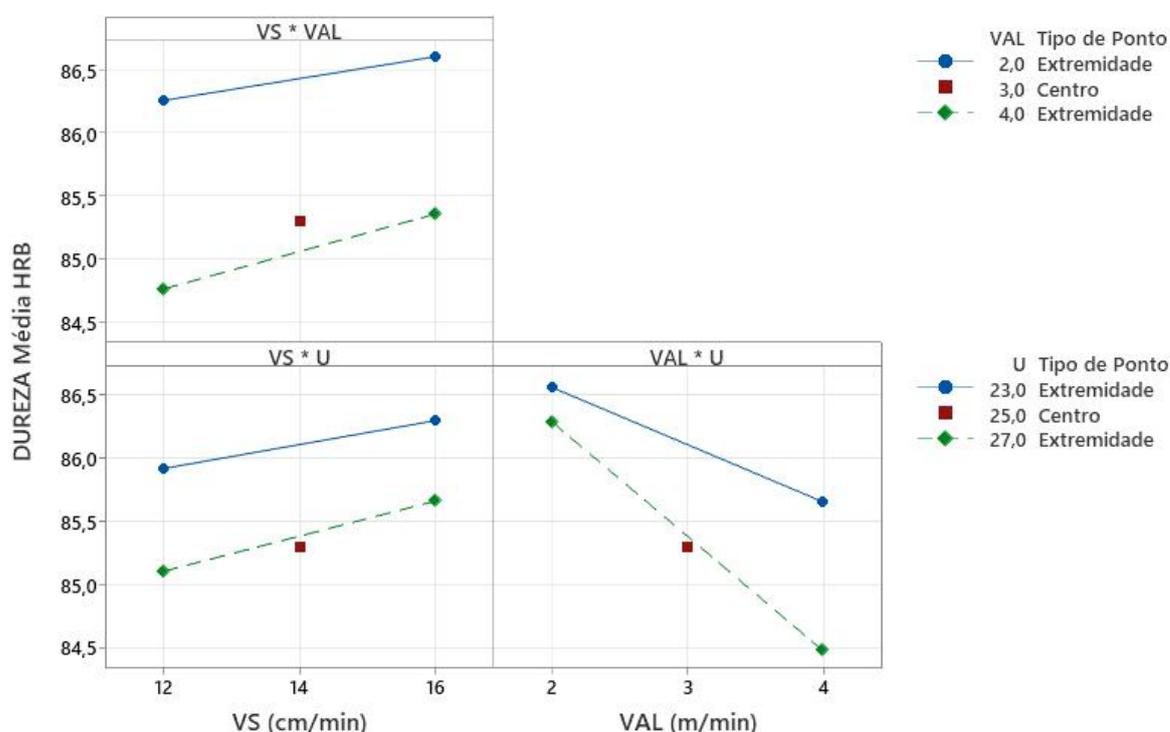


Fonte: Autor (2023)

Analisando o gráfico da figura anterior, constata-se que o ponto médio está distante do ponto médio teórico entre os dois efeitos. Porém, vale ressaltar que isso

era esperado, uma vez que isso só identifica que não existe um comportamento linear entre as duas variações. Para fator A-(VS), observa-se um acréscimo de aproximadamente 0,47 HRB em média entre seus níveis. Em relação ao fator B-(VAL), é observado a maior variação, um decréscimo de aproximadamente 1,6 HRB em média entre seus níveis. No fator C-(U), fator de segundo maior impacto, é observado uma diminuição de 0,8 HRB em média entre seus níveis. Para detalhamento dos efeitos em interação, foi construído o gráfico contido na Figura 43.

Figura 43 – Gráfico de efeito da interação entre os efeitos em relação a dureza média



Fonte: Autor (2023)

Com relação a interação (VS\*VAL) quando VS está no nível baixo (12 cm/s), ao se variar VAL entre seus dois níveis (2,0m/min e 4,0m/min), é observado um decréscimo de 1,5 HRB em média. Quando VS está em seu nível alto (16cm/min), também é observado uma diminuição na dureza média quando se aumenta a velocidade de alimentação, em torno de 1,25 HRB em média, porém ambas interações possuem tendência de aumentar a dureza na medida em que a velocidade de soldagem aumenta.

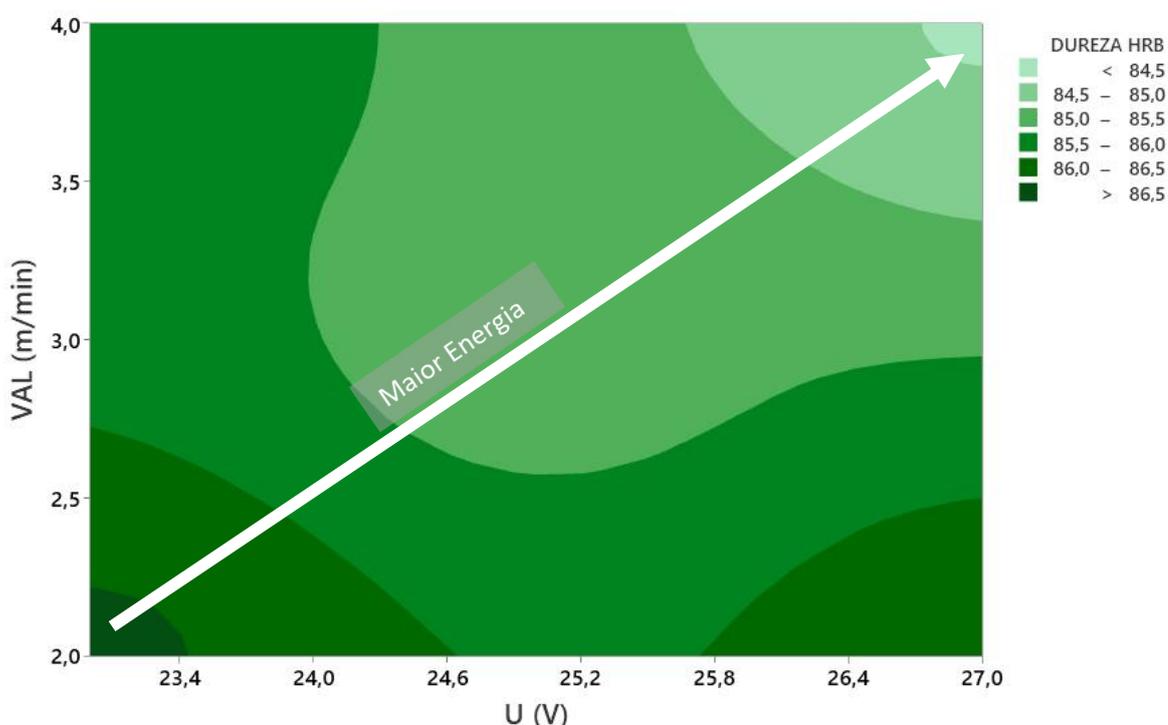
Para interação (VS\*U) quando VS está no nível baixo, ao se variar U entre seus dois níveis (23V e 27V), é observado um decréscimo de 0,8 HRB em média.

Quando VS está em seu nível alto (16cm/min), também é observado uma diminuição na dureza média quando se aumenta a tensão, em torno de 0,7 HRB em média, porém, assim como no caso anterior, a dureza média tende a aumentar quando VS aumenta.

Para interação (VAL\*U) quando VAL está em seu nível baixo (2 m/min) é observado uma pequena variação da dureza em relação as mudanças de níveis de tensão, um pequeno decréscimo de aproximadamente 0,3 HRB em média. Porém, quando o nível de VAL está em seu valor alto (4 m/min), a mudança da tensão se mostra expressiva em relação a sua variação anterior, em torno de 1,2 HRB em média.

Assim como para o número de ferrita, foi observado que energia imposta no processo é o que de fato está mudando a dureza média. Para visualizar melhor essa tendência, foi construído um gráfico de contorno para a dureza em relação a VAL e U. Esse gráfico está contido na Figura 44.

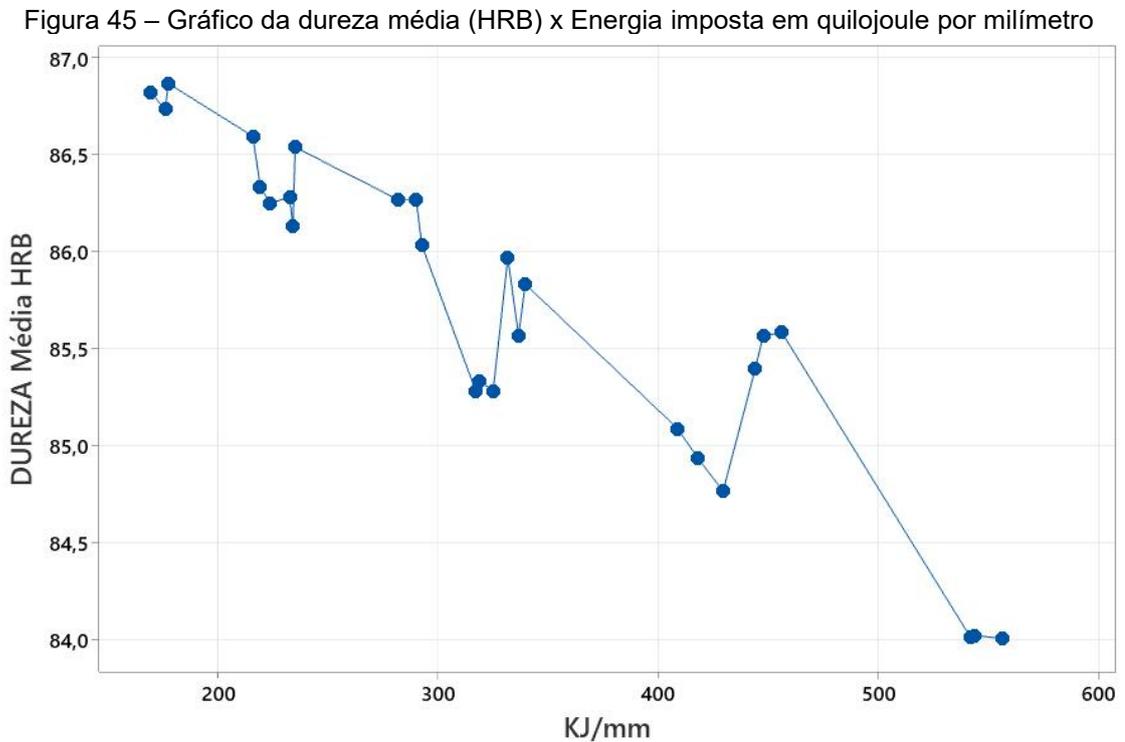
Figura 44 – Gráfico de contorno da dureza média em relação a VAL e U



Fonte: Autor (2023)

Assim como o número de ferrita, a medida em que maior energia é imposta na transferência metálica através do aumento da VAL e da U, observa-se uma

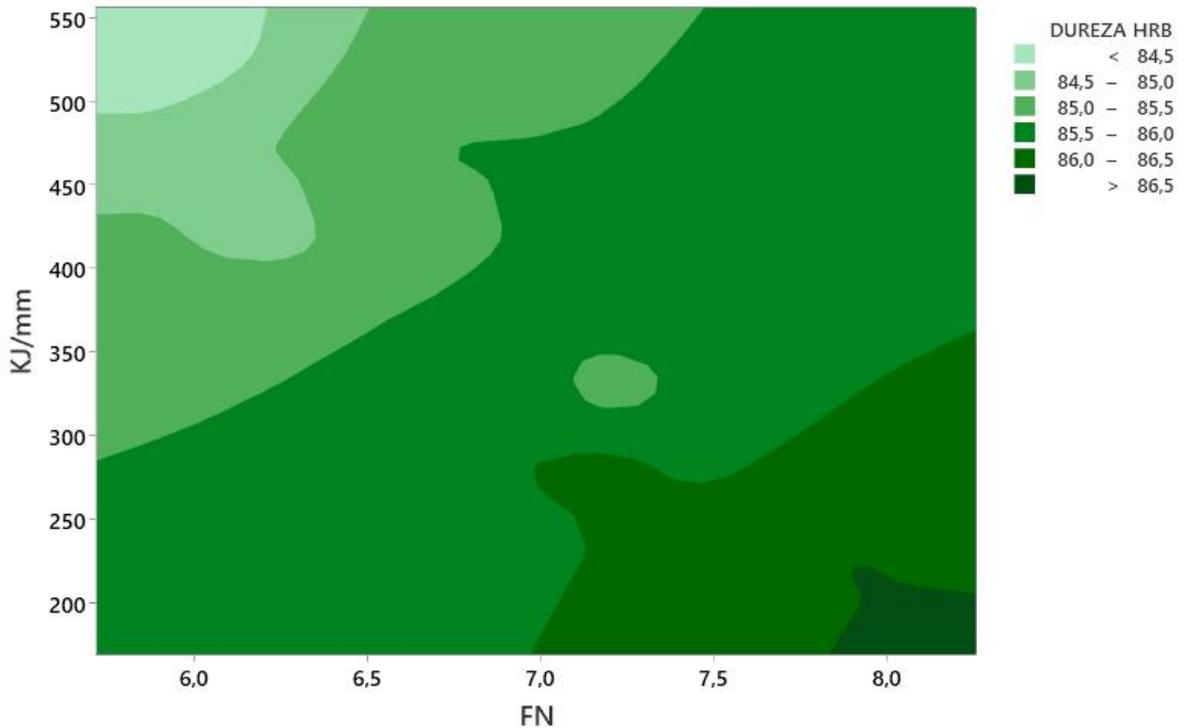
tendência de diminuição da dureza média. Na Figura 45 está o comportamento da dureza média relacionada com energia por unidade de comprimento.



Fonte: Autor (2023)

Observando o gráfico acima, é possível constatar a tendência de diminuição de dureza com o maior aporte energético registrado pelo equipamento de monitoramento. Esse comportamento era esperado, uma vez que a sobreposição das camadas se dá em temperaturas mais elevadas, com isso, supõe-se um revenimento das camadas inferiores em função do aporte térmico da nova camada que está sendo depositada. Outra hipótese para esse comportamento é que devido a frações menores de ferrita retida no material, o mesmo sofre uma queda de dureza, visto que a ferrita é uma fase mais dura que a austenita. Para mostrar como o número de ferrita e o aporte energético registrado influenciam na dureza observada no presente estudo, construiu-se o gráfico de contorno que consta na Figura 46.

Figura 46 – Gráfico de contorno da dureza média em relação ao NF e a energia em quilojoule por milímetro



Fonte: Autor (2023)

Ao observar o gráfico contido na figura anterior, é possível constatar que aportes de energia mais elevados diminuem a fração de ferrita retida na solidificação e conseqüentemente, a dureza apresenta uma tendência de queda. Por fim, obtivemos da análise experimental a equação de regressão que relaciona os fatores. Esse modelo encontra-se na Equação 11.

$$\begin{aligned} \text{Dureza Média (HRB)} = & 56,90 + 1,922*(VS) + 11,88*(VAL) + 1,222*(U) - \\ & 0,694*(VS*VAL) - 0,0759*(VS*U) - 0,520*(VAL*U) + 0,02900*(VS*VAL*U) - \\ & 0,4465*(\text{Ponto Central}) \end{aligned} \quad [11]$$

Fonte: Autor (2023)

Esse modelo possui um desvio de  $S = 0,14$  HRB, um  $R^2 = 98,07\%$  onde  $R^2(\text{Ajuste}) = 97,22\%$  e  $R^2(\text{predição}) = 95,66\%$ . Ponto Central = 86,3 HRB. No caso da dureza, devido ao caráter de variabilidade e alta interação dos fatores, ao se construir o modelo de regressão retirando o fator AC se tem uma leve queda na precisão do modelo fornecida pelo Minitab®, isso pode ser explicado pelo caráter

não linear observado na medição do ponto central em relação as extremidades. Na tabela 15 contém o resumo de como cada fator atua na dureza.

Tabela 15 – Resumo da influência dos fatores na dureza

<b>Fator</b>	<b>Influência ao variar do Nível Inferior (-) para o Nível Superior (+)</b>
(A): VS	Aumento na dureza
(B): VAL	Diminuição na dureza
(C): U	Diminuição na dureza

Fonte: Autor (2023)

## 7 CONCLUSÕES

Constata-se no presente trabalho, que entender como a resposta paramétrica do processo GMAW-P aplicado na manufatura aditiva por deposição ao arco, é de suma importância para que o mesmo seja amplamente dominado e aplicado na indústria. Os parâmetros tratados no planejamento de experimentos fatorial  $2^3$ , evidenciaram que o parâmetro de maior influência nas características da deposição via GMAW-P é a velocidade de alimentação. Uma vez que a fonte de soldagem muda todas as suas características de pulso para se adequar a taxa de arame que deve ser fundida. Com isso, é observado que maiores aportes energéticos no processo de manufatura aditiva por deposição ao arco, fazem com que o número de ferrita médio e a dureza tenham tendência de queda. Em relação a estabilidade do arco, apenas a tensão exerceu forte influência no nível de respingos. Com relação a velocidade de soldagem, a análise feita isoladamente evidenciou que apenas variar esse parâmetro é uma excelente estratégia para se controlar a geometria da peça fabricada por MADA.

Conhecer como os parâmetros trabalhados influenciaram nos experimentos com ER309LSi, é de suma importância para transportar esse conhecimento em relação a outros materiais utilizados na MADA. É importante destacar que o controle sinérgico se mostra como uma excelente forma de se facilitar a utilização do GMAW-P para a MADA.

Em síntese, é possível constatar que os parâmetros de transferência metálica tratados nesta pesquisa, revelaram como os mesmos possuem influência significativa na estabilidade da deposição, na resposta geométrica e no número de ferrita e dureza. O planejamento de experimentos fatorial  $2^3$  conseguiu quantificar de forma satisfatória a resposta que cada fator e suas interações exerceram nos dados coletados. Isso demonstra como um bom planejamento de experimentos é crucial para entender como fenômeno físico está se apresentando e, com isso, entender como melhorar o processo estudado.

## 8 PERSPECTIVAS E TRABALHOS FUTUROS

Para ampliar a compreensão da influência metalúrgica que os parâmetros de transferência metálica geram na MADA, são necessários trabalhos de investigação a nível microestrutural de cada condição trabalhada na pesquisa. Além disso, ampliar o número de ensaios mecânicos é relevante para entender as capacidades estruturais que as peças fabricadas por MADA, nas condições trabalhadas nesta pesquisa, teriam.

Outra grande contribuição seria propor formas de dissipação térmica das peças fabricadas por MADA e quantificar os ganhos que determinada taxa de resfriamento exerceria a nível produtivo e microestrutural. Esse tipo de trabalho traria a perspectiva de fornecer, aos fabricantes de equipamentos para MADA, os dados necessários para criar e acoplar, a seus equipamentos, sistemas de resfriamento para garantir o máximo desempenho produtivo e de qualidade dos componentes fabricados por MADA.

Por fim, quantificar a influência que cada parâmetro estudado exerce na resistência à corrosão seria uma contribuição de grande valia, pois seria possível correlacionar os dados obtidos da fração de ferrita resultante em cada condição com os dados obtidos do ensaio de corrosão.

## REFERÊNCIAS

AMERICAN WELDING SOCIETY (Org.). **Structural welding code - steel: AWS D1.1/D1.1M:2020: an American national standard**. 24th edition, second printing. Miami, FL: AWS, American Welding Society, 2022.

APPLEYARD, D. **Welding Pelton Runners** *Hydro Review*, 1 jul. 2012. Disponível em: <<https://www.hydroreview.com/business-finance/welding-pelton-runners/>>. Acesso em: 4 fev. 2023

ASM INTERNATIONAL (Org.). **ASM Handbook Volume 3: Alloy Phase Diagrams**. 10th edition. Materials Park, Ohio: ASM International, 2016.

BEER, F. P., JOHNSTON Jr., E. R., DEWOLF, J. T., & MAZUREK, D. F. (2013). **Mecânica dos materiais**. (5a ed.), McGraw-Hill.

BOURLET, C.; ZIMMER-CHEVRET, S.; PESCI, R.; BIGOT, R.; ROBINEAU, A.; SCANDELLA, F. **Microstructure and mechanical properties of high strength steel deposits obtained by Wire-Arc Additive Manufacturing**. *Journal of Materials Processing Technology*, v. 285, p. 116759, 1 nov. 2020.

CUNNINGHAM, C. R.; DHOKIA, V.; SHOKRANI, A.; NEWMAN, S. T. **Effects of in-process LN2 cooling on the microstructure and mechanical properties of type 316L stainless steel produced by wire arc directed energy deposition**. *Materials Letters*, v. 282, p. 128707, 1 jan. 2021.

CUNNINGHAM, C. R.; FLYNN, J. M.; SHOKRANI, A.; DHOKIA, V.; NEWMAN, S. T. **Invited review article: Strategies and processes for high quality wire arc additive manufacturing**. *Additive Manufacturing*, v. 22, p. 672–686, 1 ago. 2018.

CUNNINGHAM, C.; WANG, J.; DHOKIA, V.; SHOKRANI, A.; NEWMAN, S. **Characterisation of austenitic 316LSi stainless steel produced by wire arc additive manufacturing with interlayer cooling**. 2019.

DEBROY, T.; WEI, H. L.; ZUBACK, J. S.; MUKHERJEE, T.; ELMER, J. W.; MILEWSKI, J. O.; BEESE, A. M.; WILSON-HEID, A.; DE, A.; ZHANG, W. **Additive**

**manufacturing of metallic components – Process, structure and properties.** Progress in Materials Science, v. 92, p. 112–224, 1 mar. 2018.

DINIZ, A.E.; MARCONDES, F.C.; COPPINI, N.L. **Tecnologia da usinagem dos materiais**; Artliber, 2014.

FELDMANN, M.; KÜHNE, R.; CITARELLI, S.; REISGEN, U.; SHARMA, R.; OSTER, L. **3D-Drucken im Stahlbau mit dem automatisierten Wire Arc Additive Manufacturing**; *Stahlbau*, 2019.

GALJAARD, S.; HOFMAN, S.; REN, S. **New Opportunities to Optimize Structural Designs in Metal by Using Additive Manufacturing.** In **Advances in Architectural Geometry 2014**; Springer: Cham, Switzerland, 2015; pp. 79–93.

HUANG, J.; YUAN, W.; YU, S.; ZHANG, L.; YU, X.; FAN, D. **Droplet transfer behavior in bypass-coupled wire arc additive manufacturing.** Journal of Manufacturing Processes, v. 49, p. 397–412, 1 jan. 2020.

KLOBČAR, D.; BALOS, S.; BAŠIĆ, M.; DJURIC, A.; LINDIČ, M.; ŠČETINEC, A. **WAAM and Other Unconventional Metal Additive Manufacturing Technologies.** Advanced Technologies & Materials, v. 45, p. 1–9, 15 dez. 2020.

JAFARI, D.; VANEKER, T. H. J.; GIBSON, I. **Wire and arc additive manufacturing: Opportunities and challenges to control the quality and accuracy of manufactured parts.** Materials & Design, v. 202, p. 109471, 1 abr. 2021.

KOTECKI, D. **Ferrite determination in stainless steel welds -- Advances since 1974.** Welding Journal, 1997.

KOTECKI, D.; SIEWERT, T. **WRC-1992 constitution diagram for stainless steel weld metals: a modification of the WRC-1988 diagram.** Welding Journal, 1992.

KÜHNE, R.; FELDMANN, M.; CITARELLI, S.; REISGEN, U.; SHARMA, R.; OSTER, L. **3D printing in steel construction with the automated Wire Arc Additive Manufacturing.** ce/papers, v. 3, n. 3–4, p. 577–583, 2019.

LIBERINI, M.; ASTARITA, A.; CAMPATELLI, G.; SCIPPA, A.; MONTEVECCHI, F.; VENTURINI, G.; DURANTE, M.; BOCCARUSSO, L.; MINUTOLO, F. M. C.; SQUILLACE, A. **Selection of Optimal Process Parameters for Wire Arc Additive Manufacturing**. Procedia CIRP, 10th CIRP Conference on Intelligent Computation in Manufacturing Engineering - CIRP ICME '16. v. 62, p. 470–474, 1 jan. 2017.

LIPPOLD, J.; KOTECKI, D. **Welding metallurgy and weldability of stainless steels**. Choice Reviews Online, v. 43, n. 04, p. 43-2230-43–2230, 2005.

MARQUES, P.V.; MODENESI, P.J.; BRACARENSE, A. Q. **Soldagem - Fundamentos e Tecnologia**. Minas Gerais: Editora UFMG, 2011.

MOHEBBI, M. S.; KÜHL, M.; PLOSHIKHIN, V. **A thermo-capillary-gravity model for geometrical analysis of single-bead wire and arc additive manufacturing (WAAM)**. The International Journal of Advanced Manufacturing Technology, v. 109, n. 3, p. 877–891, 1 jul. 2020.

NETO, B. N.; SCARMINIO, I. S.; BRUNS, R. E. **Como Fazer Experimentos: pesquisa e desenvolvimento na ciência e indústria**. Quarta edição. Bookman, 2010.

O'BRIEN, Annette; GUZMAN, Carlos (Orgs.). **Welding handbook. Materials and applications. Part 1**. Eighth edition. Miami, FL: American Welding Society, 1998.

OLIVEIRA, J. P.; SANTOS, T. G.; MIRANDA, R. M. **Revisiting fundamental welding concepts to improve additive manufacturing: From theory to practice**. Progress in Materials Science, v. 107, p. 100590, 1 jan. 2020.

PINTO, F. C.; SOUZA FILHO, I. R.; SANDIM, M. J. R.; SANDIM, H. R. Z. **Defects in parts manufactured by selective laser melting caused by  $\delta$ -ferrite in reused 316L steel powder feedstock**. Additive Manufacturing, v. 31, p. 100979, 1 jan. 2020.

QUEGUINEUR, A.; RÜCKERT, G.; CORTIAL, F.; HASCOËT, J. Y. **Evaluation of wire arc additive manufacturing for large-sized components in naval applications**. Welding in the World, v. 62, n. 2, p. 259–266, 1 mar. 2018.

REIMANN, J.; HENCKELL, P.; ALI, Y.; HAMMER, S.; RAUCH, A.; HILDEBRAND, J.; BERGMANN, J.P. **Production of Topology-optimised Structural Nodes Using Arc-based, Additive Manufacturing with GMAW Welding Process.** J. Civ. Eng. Constr. 2021, 10, 101–107.

R. SOPELSA. **Análise da Deposição de Revestimentos de Aço Inoxidável AWS 309L Por MIG em Substrato de Aço Carbono**, UFPR, dez 2013.

SCOTTI, A; PONOMAREV, V. **Soldagem MIG/MAG: melhor entendimento, melhor desempenho.** São Paulo: Artliber, 2014.

SEO, H.-D.; LEE, J. M. **Novel welding distortion analysis method for large welded structures using orthotropic thermal expansion coefficients.** Journal of Computational Design and Engineering, v. 8, n. 4, p. 1115–1124, 1 ago. 2021.

Standard Terminology for Additive Manufacturing – General Principles – Terminology, **ISO/ASTM52900**, ASTM International, (West Conshohocken, PA 2021)

TANG, H. P.; QIAN, M.; LIU, N.; ZHANG, X. Z.; YANG, G. Y.; WANG, J. **Effect of Powder Reuse Times on Additive Manufacturing of Ti-6Al-4V by Selective Electron Beam Melting.** JOM, v. 67, n. 3, p. 555–563, 1 mar. 2015.

TAŞDEMİR, A.; NOHUT, S. **An overview of wire arc additive manufacturing (WAAM) in shipbuilding industry.** Ships and Offshore Structures, v. 16, n. 7, p. 797–814, 9 ago. 2021.

TREUTLER, K.; WESLING, V. **The Current State of Research of Wire Arc Additive Manufacturing (WAAM): A Review.** Applied Sciences, v. 11, n. 18, p. 8619, jan. 2021.

VENTURINI, G.; MONTEVECCHI, F.; SCIPPA, A.; CAMPATELLI, G. **Optimization of WAAM Deposition Patterns for T-crossing Features.** Procedia CIRP, 5th CIRP Global Web Conference - Research and Innovation for Future Production (CIRPe 2016). v. 55, p. 95–100, 1 jan. 2016.

VORA, J.; PARMAR, H.; CHAUDHARI, R.; KHANNA, S.; DOSHI, M.; PATEL, V. **Experimental investigations on mechanical properties of multi-layered**

**structure fabricated by GMAW-based WAAM of SS316L.** Journal of Materials Research and Technology, v. 20, p. 2748–2757, 1 set. 2022.

WEI, H. L.; BHADESHIA, H. K. D. H.; DAVID, S. A.; DEBROY, T. **Harnessing the scientific synergy of welding and additive manufacturing.** Science and Technology of Welding and Joining, v. 24, n. 5, p. 361–366, 4 jul. 2019.

WILLIAMS, S. W.; MARTINA, F.; ADDISON, A. C.; DING, J.; PARDAL, G.; COLEGROVE, P. **Wire + Arc Additive Manufacturing.** Materials Science and Technology, v. 32, n. 7, p. 641–647, 2 maio 2016.

WESLING, V.; BOHN, C.; EHLERS, R.; ESDERTS, A.; HARTMANN, S.; LOHRENGEL, A.; LORENZ, S.; RAUSCH, A.; REMBE, C.; INKERMANN, D.; et al. **Werkstofforientierte Prozesskette für Multimaterielle, Lichtbogenadditiv Gefertigte (WAAM) Strukturbauteile.** Collaborative Research Center of the German Research Foundation (DFG): Calusthal-Zellerfeld, Germany, 2021.

XIE, B.; XUE, J.; REN, X. **Wire Arc Deposition Additive Manufacturing and Experimental Study of 316L Stainless Steel by CMT + P Process.** Metals, v. 10, n. 11, p. 1419, nov. 2020.

YAO, P.; LIN, H.; WU, W.; TANG, H. **Influence of Duty Ratio and Current Mode on Robot 316L Stainless Steel Arc Additive Manufacturing.** Metals, v. 11, n. 3, p. 508, mar. 2021.