

**UNIVERSIDADE DO ESTADO DO AMAZONAS
ENGENHARIA MECÂNICA**

GILDA GABRIELLY SOUZA DE ANDRADE

**INFLUÊNCIA DOS PARAMETROS DE PROCESSO NA FABRICAÇÃO DE
SESSÕES DE TUBO METÁLICAS VIA MANUFATURA ADITIVA POR
DEPOSIÇÃO A ARCO.**

MANAUS

2022

GILDA GABRIELLY SOUZA DE ANDRADE

**INFLUÊNCIA DOS PARAMETROS DE PROCESSO NA FABRICAÇÃO DE
SESSÕES DE TUBO METÁLICAS VIA MANUFATURA ADITIVA POR
DEPOSIÇÃO A ARCO.**

Trabalho de Conclusão de Curso
apresentado a Universidade do Estado do
Amazonas, como requisito parcial para
obtenção do título de Engenheira Mecânica.

Orientador: Prof. Dr. Rubelmar Maia de Azevedo Cruz Neto

Coorientador: Prof. Dr. Jaime Casanova Soeiro Junior

MANAUS

2022

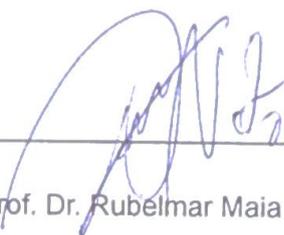
GILDA GABRIELLY SOUZA DE ANDRADE

**INFLUÊNCIA DOS PARAMETROS DE PROCESSO NA
FABRICAÇÃO DE SESSÕES DE TUBO METÁLICAS VIA
MANUFATURA ADITIVA POR DEPOSIÇÃO A ARCO.**

Trabalho de Conclusão de Curso
apresentado a Universidade do Estado do
Amazonas, como requisito parcial para
obtenção do título de Engenheira
Mecânica.

Aprovado em: 30 / 05 / 2022.

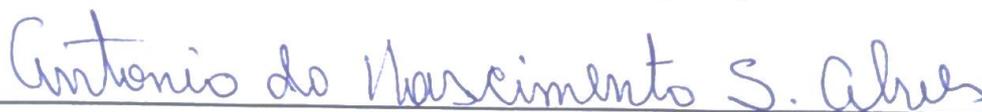
BANCA EXAMINADORA



Orientador: Prof. Dr. Rubelmar Maia de Azevedo Cruz Neto
Universidade do Estado do Amazonas (UEA)



Coorientador: Prof. Dr. Jaime Casanova Soeiro Junior
Universidade Federal do Amazonas (UFAM)



Prof. Dr. Antonio do Nascimento Silva Alves
Universidade Federal do Amazonas (UFAM)

AGRADECIMENTOS

Eu gostaria de primeiro agradecer aos cinco seres que mais me dão força para enfrentar qualquer desafio que possa aparecer na minha vida: meus irmãos, Giovanna, Isabelle, Miguel, Matheus e Gael. Se amor fosse um lugar, ele seria onde vocês estão.

Aos meus pais, Francly Mara e Raimundo Andrade, por serem minha base, sempre me apoiarem e torcerem por mim. Tudo que sou hoje, devo a vocês.

Aos meus professores e orientadores, Rubelmar Neto e Jaime Casanova, pela paciência, dedicação e conhecimento compartilhado. Vocês são grandes exemplos para mim.

Aos meu melhor amigo e namorado, João Borges, por todas as noites em claro comigo e por sempre oferecer suporte, ajuda, companhia e amor.

À minha maior parceira de faculdade e da vida, Cauanne Cavalcante. Eu não teria chegado aqui se não fosse você. Muito obrigada por tudo, por sempre.

Às minhas melhores amigas de infância, Milena Paiva, Geovanna Martins e Clara Mota, por todo suporte, torcida e amizade, mesmo depois de tanto tempo.

Aos meus colegas da UFAM, Denilson, Caio e Michelle, e meu parceiro de experimentos Fabrício que sempre estiveram dispostos a ajudar e a dar boas risadas mesmo quando tudo dava errado.

Ao sr. Edson Silva, do INDT, que não mediu esforços para ajudar no desenvolvimento desse trabalho. Obrigada pelo conhecimento e tempo compartilhado.

À toda minha família e amigos, que seguiram nessa trajetória comigo. Aos que ainda estão presentes e os que já partiram ou se afastaram, mas vivem em meu coração.

RESUMO

A Manufatura Aditiva vem cada vez mais tomando espaço na indústria mundial e se consagrando como uma boa alternativa às tecnologias subtrativas. Uma das áreas da manufatura aditiva que tem se mostrado muito promissora é a Manufatura Aditiva por Deposição A Arco (MADA), que se destaca devido a sua alta taxa de deposição e possibilidade de criar geometrias complexas com uma ótima razão Buy-To-fly, quando em comparação, por exemplo, ao processo de usinagem. Em MADA, dá-se destaque ao processo de deposição por GMAW (*Gas Metal Arc Welding*), onde é utilizado o arco elétrico como fonte de calor. Este trabalho buscou analisar o comportamento geométrico de peças cilíndricas fabricadas por MADA, através de experimentos variando três características principais: Faixa de temperatura interpasse, número de camadas e diâmetro da sessão de tubo. Após a fabricação dos corpos de prova, foi utilizado um scanner 3D para gerar um modelo CAD dos corpos de prova soldados (afim de se obter as dimensões reais das peças soldadas) e realizado inspeção das alturas através de uma superfície de comparação entre a malha gerada pelo scanner e um modelo “padrão” 3D. Após as análises estatísticas, foi encontrado apenas um modelo trivial, onde, para o delineamento usado nesse trabalho, mostra que o Número de Camadas é o parâmetro de maior influência na altura dos corpos de prova.

Palavras-Chave: MIG/MAG; manufatura aditiva por deposição a arco; MADA; WAAM.

ABSTRACT

Additive Manufacturing is increasingly taking space in the world industry and establishing itself as a good alternative to subtractive technologies. One of the areas of additive manufacturing that has shown to be very promising is *Wire + Arc Additive Manufacturing* (WAAM), which stands out due to its high deposition rate and the possibility of creating complex geometries with a great Buy-To-fly ratio, when compared, for example, to the machining process. In MADA, the deposition process by GMAW (Gas Metal Arc Welding) is highlighted, where the electric arc is used as a heat source. This work sought to analyze the geometric behavior of cylindrical parts manufactured by MADA, through experiments varying three main characteristics: Interpass temperature range, number of layers and diameter of the tube section. After manufacturing the experiments, a 3D scanner was used to generate a CAD model of the welded parts (in order to obtain the real dimensions of them) and an inspection of the heights was carried out through a comparison surface between the generated mesh. by the scanner and a “standard” 3D model. After the statistical analyses, only a trivial model was found, which, for the design used in this work, shows that the Number of Layers is the parameter with the greatest influence on the height of the experiments.

Keywords: GMAW; *Wire + Arc Additive Manufacturing*; WAAM.

LISTA DE ILUSTRAÇÕES

Figura 1 - Esquema de soldagem MIG/MAG.....	13
Figura 2 - representação de área e largura efetiva	16
Figura 3 - Diferença de alturas em uma única camada.....	17
Figura 4- Esquemática soldagem MIG/MAG	18
Figura 5 - Sentido de soldagem X geometria da peça	19
Figura 6 - Equipamento de soldagem	21
Figura 7 - CNC GL-3020	22
Figura 8 - Software MACH 3	22
Figura 9 - Apêndice com ponto de abertura e fechamento de arco.....	23
Figura 10 - Sistema de aquisição de dados SAP	23
Figura 11 - Software SAPTiV4.35s.....	24
Figura 12 - Termômetro infravermelho	25
Figura 13 - Pontos de aferição de temperatura	25
Figura 14 - GOM ATOS Triplescam	26
Figura 15 - Exemplos de relatório de inspeção - GOM INSPECT	26
Figura 16 - Vista lateral dos corpos de prova – (a) CP01, (b) CP02, (c) CP03, (d) CP04, (e) CP05, (f) CP06, (g) CP07, (h) CP08, (i) CP09, (j) CP10, (k) CP11, (l) CP12, (m) CP13, (n) CP14.....	27
Figura 17- Vista superior dos corpos de prova – (a) CP01, (b) CP02, (c) CP03, (d) CP04, (e) CP05, (f) CP06, (g) CP07, (h) CP08, (i) CP09, (j) CP10, (k) CP11, (l) CP12, (m) CP13, (n) CP14.....	28
Figura 18 - Deslocamento do cordão	29
Figura 19 - Gráfico corrente média X tempo	29
Figura 20- gráfico de Pareto para Hm (paq.).....	32
Figura 21 - Gráfico de Pareto - Hm (paq.) após SS	33
Figura 22 - Gráfico de Pareto para Hm (scanner)	35
Figura 23 - Sumário do modelo (Hm - Scanner) após SS	35
Figura 24 - Gráfico de Pareto Hm scanner após SS	36
Figura 25 - Gráfico de Pareto Em.....	37

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 - Parâmetros de processo v.s. influência no cordão de solda	14
Tabela 2 - Delineamento do projeto	20
Tabela 3 - Parâmetros de soldagem	21
Tabela 4 - sumário do modelo para Hm (paq.).....	30
Tabela 5 - Análise de variância da Hm (paq.)	31
Tabela 6- sumário do modelo - Hm após SS.....	32
Tabela 7 - Análise de variância - Hm (paq.) após SS.....	33
Tabela 8 - Sumário do modelo (Hm - scanner)	34
Tabela 9 - Comparação Hm (paq.) vs Hm (scanner).....	34
Tabela 10 - Análise de variância de Hm (scanner).....	34
Tabela 11 - Análise de variância (Hm scanner) após SS	35
Tabela 12 - Sumário do modelo Em.....	36
Tabela 13 - Análise de variância Em.....	37

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

BTF	<i>Buy to fly</i>
CAD	<i>Computer Aided Design</i>
CP	Corpos de prova
DBCP	Distância do Bico de contato à peça
GMAW	<i>Gas Metal Arc Welding</i>
GTAW	<i>Gas Tungest Arc Welding</i>
MADA	Manufatura Aditiva por Deposição a Arco
MAG	<i>Metal Active Gas</i>
MIG	<i>Metal Inert Gas</i>
PTA	Plasma com Arco Transferido
TCC	Trabalho de Conclusão de Curso
TIG	<i>Tungsten Inert Gas</i>
WAAM	<i>Wire Arc Additive Manufacturing</i>

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO	11
2	REFERENCIAL TEÓRICO	13
2.1	Soldagem MIG/MAG:	13
2.2	Manufatura aditiva/ Manufatura aditiva por deposição a arco:	15
2.3	Gerenciamento térmico	16
2.4	Estratégias de deposição de camadas:	17
3	MATERIAIS E MÉTODOS	19
3.1	Delineamento de projeto:	Erro! Indicador não definido.
3.2	Materiais	Erro! Indicador não definido.
3.2.1	Material de Base	Erro! Indicador não definido.
3.2.2	Material de adição	20
3.3	Experimento MADA:	21
3.3.1	Processo de soldagem:	21
3.3.2	Sistema de movimentação e delimitação de trajetória:	22
3.3.3	Delimitação da trajetória:	23
3.4	Equipamentos de aferição	23
3.4.1	Sensores termopar	24
3.4.2	Metodologia para aquisição de temperatura interpasse:	24
3.5	Inspeção e análise:	25
4	RESULTADOS E DISCUSSÕES	27
4.1	Confecção dos corpos de prova:	27
4.2	Dificuldades de construção e análise:	28
4.3	Resultados das análises:	30
4.3.1	Análise da altura média (Hm) – medição de peça física com paquímetro:...	30
4.3.2	Altura média (Hm) após <i>Stepwise Selection</i>	32
4.3.3	Análise da altura média (Hm) – medição de peça através do relatório no Scanner 3D	34
4.3.4	Altura Média (Hm - scanner) após o <i>Stepwise Selection</i>	35
4.3.5	Análise de espessura Média (Em):	36
5	CONCLUSÃO E TRABALHOS FUTUROS	38
	REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	39

1 INTRODUÇÃO

Com o advento da Indústria 4.0, iniciou-se uma busca por novas tecnologias de fabricação que possibilitassem uma alta taxa de produção com um baixo desperdício de material. Atualmente, a “menina dos olhos” da indústria, sendo uma alternativa aos processos subtrativos, é a Manufatura Aditiva (MA).

Iniciada na década de 80 por Charles W. Hull com o processo de Estereolitografia, técnica utilizada posteriormente na primeira impressora 3D (ALCADE, 2019), a Manufatura Aditiva consiste em um processo de fabricação através de sobreposição progressiva de materiais a partir de um modelo CAD 3D. Esse processo vem se aprimorando cada vez mais para satisfazer às demandas industriais e é utilizada em uma ampla gama de processos, indo desde a prototipação até o produto final, atendendo vários ramos da indústria, desde o setor aeronáutico até o setor da saúde.

Entre os processos de MA mais utilizados atualmente, devido à sua alta taxa de deposição, e possibilidade de criar geometrias complexas com precisão e facilidade (Gierth *et al.*, 2020), temos a Manufatura Aditiva por Deposição a Arco (MADA), do inglês “*Wire + Arc Additive Manufacturing*” (WAAM). Esse processo realiza a deposição de camadas dos componentes utilizando o arco elétrico como fonte de calor (HACKENHAAR, 2020).

Em MADA, o material de adição é fundido a partir de um laser, feixe de elétrons ou arco voltaico. A soldagem por arco elétrico pode utilizar dois principais processos: *Gas Metal Arc Welding* (GMAW) e *Gas Tungest Arc Welding* (GTAW). GMAW, ou Soldagem ao Arco Elétrico com Atmosfera de Proteção Gasosa, tem grande aplicação e importância na Manufatura Aditiva devido à sua alta eficiência de deposição, baixo custo, operação automática e boas propriedades mecânicas (Hu *et al.*, 2017).

Devido ao crescimento do mercado na área de MADA e de suas alta aplicabilidade na indústria, este trabalho tem como objetivo estudar a influência dos parâmetros de processo (diâmetro da sessão, faixa de temperatura interpasse e número de camadas depositadas) na fabricação de sessões de tubo via soldagem MIG/MAG convencional em MADA, avaliando como suas variações podem afetar a área efetiva e altura da peça final.

1.1 Objetivos

Estudar a influência dos parâmetros de processo na fabricação de sessões de tubo via GMAW em MADA.

2.1 Objetivos específicos:

- Avaliar a influência da mudança de diâmetro, faixa de temperatura interpasse e número de camadas sobrepostas sob a geometria da peça fabricada através de MADA;
- Avaliar o comportamento entre camadas do processo de manufatura aditiva via MIG/MAG convencional.

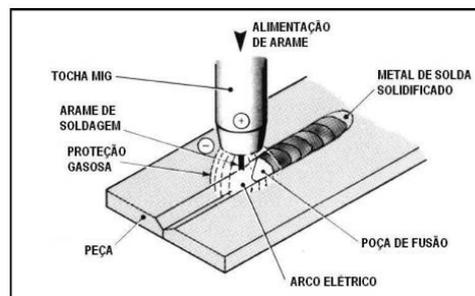
2 REFERENCIAL TEÓRICO

2.1 Soldagem MIG/MAG

“Denomina-se soldagem ao processo de união entre duas partes metálicas, usando uma fonte de calor, com ou sem aplicação de pressão. A solda é o resultado desse processo.” (Wainer *et al.*, 1992, p.1)

Em GMAW há dois tipos de soldagem principais: soldagem MIG (*Metal Inert Gas*) e MAG (*Metal Active Gas*). Em ambas, um arco elétrico é estabelecido entre a peça e um consumível (metal de adição) sendo este fundido continuamente enquanto é alimentado à poça de fusão. Durante o processo, um fluxo de gás inerte ou ativo protege a poça de fusão (ESAB, 2005). Uma característica importante desse método é que ele pode ser automático, através do uso de robôs, ou semiautomático, através de um alimentador de metal de adição motorizado.

Figura 1 - Esquema de soldagem MIG/MAG



Fonte: Adaptado de ESAB (2015)

A soldagem MIG utiliza argônio como gás inativo e é mais utilizada para soldagem de alumínio, aço inoxidável e cobre. A soldagem MAG usa a mistura de Co_2 e Argônio para soldagem de aço carbono e suas ligas.

O processo de soldagem por MIG/MAG funciona com corrente contínua (CC), normalmente com o arame localizado no polo positivo, configuração conhecida como polaridade reversa (ESAB, 2005).

Segundo MODENESI E MARQUES (2015), para MIG/MAG é extremamente necessária a seleção e ajustes corretos dos parâmetros de soldagem devido ao seu maior número de variáveis e sua forte inter-relação. A seleção incorreta dos parâmetros resulta em soldas insatisfatórias devido a problemas metalúrgicos e/ou operacionais como, por exemplo, instabilidade do arco,

transferência de metal inadequada, respingos, falta de fusão ou de penetração e porosidade. Os principais parâmetros de soldagem e suas influências na solda estão listados na Tabela 1.

Tabela 1 - Parâmetros de processo v.s. influência no cordão de solda

Parâmetros	Influência no cordão de solda
Tipo do gás de proteção	A variação do gás de proteção pode afetar o formato do cordão depositado, o modo de transferência do metal de adição, as características do arco e, no caso de gases ativos, as suas características metalúrgicas.
Velocidade de alimentação do arame	A velocidade de alimentação é diretamente proporcional à corrente.
Vazão do gás de proteção	Se muito baixa, não haverá gás suficiente para manter a proteção do cordão. Se muito alta, pode acontecer turbulências no gás. Quanto maior a intensidade de corrente, maior deve ser a vazão do gás e maior o diâmetro do bocal da tocha.
Comprimento do eletrodo e distância do bico de contato à peça (DBCP)	Quanto maior o comprimento do eletrodo ou um maior afastamento da tocha em relação à peça, menor a quantidade de calor cedido à peça e a penetração do cordão (devido ao aquecimento do eletrodo por efeito Joule).
Corrente de soldagem	A corrente de soldagem influencia na velocidade de fusão do arame, na penetração, o reforço e a largura do cordão (variação diretamente proporcional com a corrente quando as demais variáveis são mantidas constantes).
Tensão de soldagem	Quanto maior a tensão, maior a largura do cordão e menor a sua convexidade. Valores muito altos causam porosidade, respingos e mordeduras e valores muito baixos podem causar porosidade, convexidade excessiva e dobras na margem do cordão.
Velocidade de soldagem	A velocidade de soldagem interfere diretamente na energia de soldagem e nas dimensões do cordão de solda.

Fonte: MODENESI E MARQUES (2015)

2.2 Manufatura aditiva/ Manufatura aditiva por deposição a arco

“Manufatura aditiva é o processo de união de materiais para produzir objetos a partir de um modelo 3D, geralmente camada a camada, em oposição às metodologias de fabricação subtrativas.” (ISO/ASTM 52900, 2015)

Segundo (GIBSON *et al.*, 2010) existem diferentes tecnologias empregadas na manufatura aditiva, onde podemos citar algumas, como:

- Fotopolimerização, que usa um polímero fotocurável como matéria prima, realizando a cura do material através de um laser.
- Fusão de pós pré-depositados, onde um feixe eletrônico funde seletivamente regiões de um leito com pó pré-depositado, cujos materiais utilizados são polímeros, cerâmicas e metais.
- Cladding 3D, através de Laser e PTA, onde o material de adição é injetado diretamente no feixe/poça.
- Arco elétrico, onde a fonte de energia é um arco elétrico que funde o material de adição. Nesse processo, podem ser utilizados PTA, plasma arame, TIG, MIG/MAG

Os processos a arco elétrico são denominados Manufatura Aditiva por deposição a arco (MADA). Segundo MARTINA; WILLIAMS, 2015, as vantagens específicas desta classe particular de processos em MA são, entre outros: redução no desperdício de material; alta taxa de deposição; custo de fabricação muito menor do que os processos à base de pó; potencialmente sem limitação no tamanho da peça e possibilidade de usinagem em processo.

Para calcular o aproveitamento de material em MADA, uma das estratégias usadas é a razão *Buy-to-fly* (BTF), que é definida como a razão entre o volume ou massa da peça inicial de trabalho e da peça acabada (MARTINA, 2015) aplicada a indústria aeronáutica, ou de forma genérica *Buy-to-Apply*. A BTF depende do quão próximo o formato da peça depositada é do formato da peça acabada, após a usinagem. Mais material será aproveitado quanto mais próximo de 1 for o índice (SILVA, 2020).

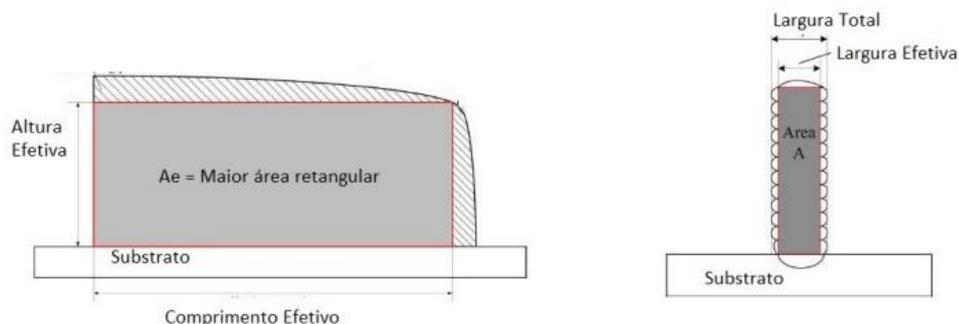
Comparações entre MA e as formas subtrativas de manufatura (como usinagem), são constantemente realizadas. Estudos com a relação BTF, por exemplo, mostram

valores de MADA variando de 1.5 a 3, enquanto para usinagem esses valores variam entre 6 e 50 (MARTINA, 2015).

Outra forma para analisar o aproveitamento em MADA seria calcular a eficiência da deposição, conforme realizado por Yang (2016) e Zhang (2018).

O volume efetivo é a estimativa do máximo volume que pode ser obtido a partir do volume total. A altura, comprimento e largura efetivos são calculados a partir do retângulo de maior área que pode ser inscrito na parede depositada, conforme mostrado na figura abaixo. (SILVA, 2020).

Figura 2 - representação de área e largura efetiva



Fonte: SILVA, 2020 (adaptado de Yang, 2016)

2.3 Gerenciamento térmico

Uma grande característica da WAAM é sua alta taxa de deposição, o que gera um acúmulo de calor devido ao balanço energético positivo, quando há uma maior entrada de calor que saída. (Da Silva *et al.*, 2020).

Segundo Yang *et al.* (2017), o aquecimento repetitivo gerado com a sobreposição progressiva de camadas e a entrada de calor excessiva gerada na MA por GMAW leva a grandes tensões residuais, distorções, um pior acabamento superficial e menor precisão geométrica. Portanto, a necessidade de estudos de gerenciamento térmico na área da soldagem é crucial, principalmente devido a sua influência na forma final e nas propriedades mecânicas da peça.

O gerenciamento térmico pode ser definido como um conjunto de abordagens e técnicas utilizadas para controlar a temperatura (por aquecimento ou resfriamento) da

peça durante todo o tempo de deposição e em alguns casos posteriormente (Da Silva *et al.*, 2021).

Esse gerenciamento pode ser feito através do controle da temperatura de interpasse, também conhecida como temperatura entre camadas (a qual as camadas de solda subsequentes são realizadas). O método de controle comumente utilizado é o de resfriamento natural (Yang *et al.*, 2017)., pois não há necessidade de fazer implementação de novos sistemas no dispositivo de soldagem. Porém, quando se trata de tempo de deposição, esse procedimento se torna muitas vezes inviável devido ao seu aumento conforme sobe o número de camadas. Para contornar isso, já estão em andamento vários estudos de resfriamento de peças em MADA.

2.4 Estratégias de deposição de camadas

Na soldagem por MIG/MAG, é observado naturalmente uma diferença no de altura no cordão nos pontos de abertura e de fechamento de arco, sendo a região de início mais alta que a região de término, como é possível observar na Figura 3.

Figura 3 - Diferença de alturas em uma única camada

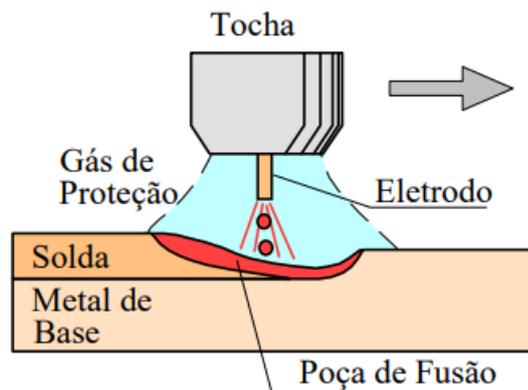


Fonte: Elaboração própria

Segundo XIONG *et al.* (2016), isso acontece devido aos seguintes fatores: Na área de abertura do arco há uma excelente dissipação de calor, o que faz com que as gotículas de metal transferidas para a poça de fusão não tenham tempo suficiente para se espalhar, resultando em uma rápida solidificação do cordão. Logo em seguida, o metal líquido que está sob o arco é lançado para a cauda da poça de fusão, fazendo com que ele flua para o metal já solidificado, aumentando a dimensão do arco na área de abertura de cordão. Na área chamada de “arco estável”, no meio do cordão, a poça de fusão localizada abaixo do arco é aprofundada devido ao efeito do arco e à força

de impacto das gotículas de metal, e o metal líquido continua sendo lançado para a cauda da poça de fusão, o que resulta em uma forma inclinada da mesma. Quando o processo chega ao ponto de fechamento de arco, a poça de fusão com a forma inclinada não pode fazer refluxo e se solidifica rapidamente devido a uma diminuição repentina da entrada de calor.

Figura 4- Esquemática soldagem MIG/MAG



Fonte: Modenesi e Marques (2015)

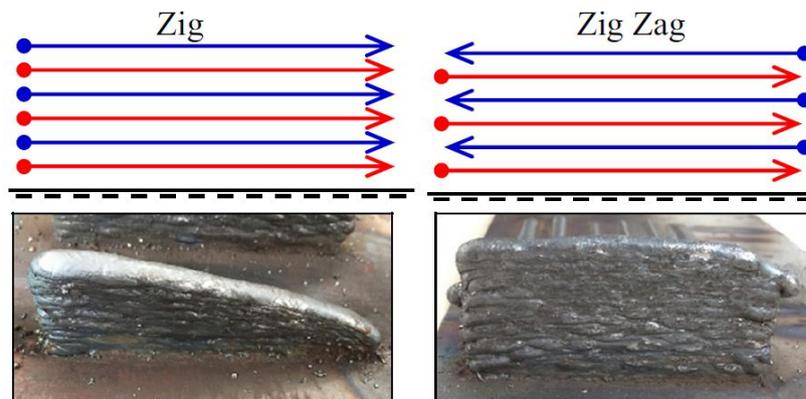
Na soldagem MIG/MAG convencional, não há um impacto muito significativo desse fenômeno. Porém, quando se trata de uma sobreposição progressiva de material, como vemos em MADA, conforme há incremento de camadas na peça, essa diferença de altura entre o ponto de abertura e fechamento de arco se torna muito significativa. Isso, além de gerar uma irregularidade na geometria do cordão, pode influenciar nas propriedades e na estabilidade do cordão, devido a variação na distância do bico de contato à peça (DBCP).

Com base nessas observações, estratégias foram determinadas para a melhora na geometria do cordão, aplicadas em duas formas de caminho: fechado e aberto.

Para peças com caminho fechado, foi proposto por XIONG *et al.* (2016), que a área de abertura e fechamento do arco na mesma camada fossem sobrepostas para compensar a diferença de altura e, para que não haja saliência na superfície sobreposta, manter a corrente constante e aumentar a velocidade de soldagem e a tensão do arco. Já Hu *et al.* (2017) propõe que seja utilizado um padrão de rampa escalonada com um caminho de solda contínuo.

Para peças de caminho aberto, XIONG *et al.* (2016) e Hu *et al.* (2017) sugerem alternar a direção de deposição, de forma que a diferença de altura entre os pontos seja compensada. Para as diferenças de trajetórias, adotou-se a nomenclatura de “ZIG” para um sentido único e “ZIG-ZAG” para o sentido alternado.

Figura 5 - Sentido de soldagem X geometria da peça



Fonte: Hu *et al.* (2017)

3 MATERIAIS E MÉTODOS

3.1 Delineamento de projeto

Através de experimentos realizados para auxiliar na definição dos pontos críticos das variáveis em estudo, e devido as limitações dos equipamentos de estudo, foi determinado o seguinte intervalo de medição:

- Numero de camadas: estabelecido experimentos de 5, 10 e 15 camadas.
- Diâmetro da sessão de tubo: estabelecido variações de 30mm, 60mm e 90mm.
- Faixa de temperatura interpasse:
 - Faixa baixa: temperatura varia de 80°C a 100°C
 - Faixa alta: temperatura varia de 150°C a 170°C

Para os experimentos, foi definido o delineamento de projeto utilizando o software *Minitab*® no worksheet de Experimento fatorial completo. Através do delineamento, ficou definido tais experimentos:

Tabela 2 - Delineamento do projeto

Ordem ensaio	Ponto central	Número de camadas	Diâmetro da sessão	Faixa de temperatura interpasse
1	1	5	90	Baixa
2	0	10	60	Alta
3	0	10	60	Alta
4	1	15	30	Baixa
5	1	5	30	Alta
6	1	15	30	Alta
7	1	5	30	Baixa
8	0	10	60	Baixa
9	0	10	60	Alta
10	0	10	60	Baixa
11	1	5	90	Alta
12	1	15	90	Baixa
13	0	10	60	Baixa
14	1	15	90	Alta

Fonte: Autoria própria

3.2 Materiais

3.2.1 Substrato

Para o substrato dos experimentos, foi escolhido o aço ASTM A36, um material estrutural muito comum na indústria, classificado como um aço carbono de média resistência mecânica, com boa disponibilidade de mercado, custo-benefício e boa soldabilidade. (ALLGAYER, 2017)

3.2.2 Material de adição

O material de adição (arame maciço) utilizado foi o ASME SFA – 5.18 ERS70S-6, com 1mm de diâmetro.

3.3 Experimento MADA

3.3.1 Processo de soldagem

Para a realização dos experimentos foram utilizados os equipamentos localizados no Laboratório de Soldagem da UFAM (Universidade Federal do Amazonas).

Neste trabalho foi utilizada solda MIG utilizando o equipamento ESAB Warrior™ 400i, com uma mistura gasosa de 80%Ar-20% CO₂, conforme ilustrado na Figura 6.

Figura 6 - Equipamento de soldagem



Fonte: Autoria Própria

Os parâmetros de soldagem utilizados foram:

Tabela 3 - Parâmetros de soldagem

Parâmetros	Valores
Corrente	200 A
Tensão	19 V
Velocidade de alimentação	6,5 m/min
DBCP	6 mm
Vazão de gás	15 L/mm

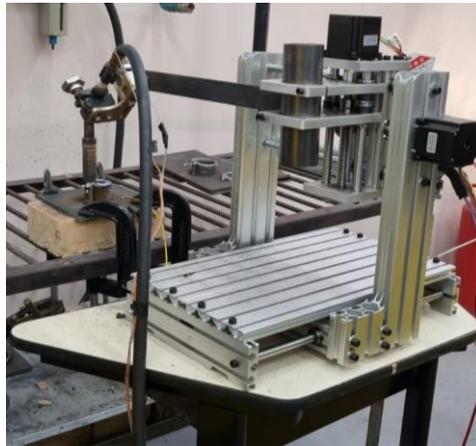
Fonte: Autoria própria

3.3.2 Sistema de movimentação e delimitação de trajetória

Para que a trajetória pudesse ser realizada, foi utilizada uma CNC de bancada modelo CNC GL-3020 (Figura 7) adaptada com um acoplador para a tocha de soldagem. A soldagem foi realizada de forma semiautomática - a movimentação realizada pela CNC, mas a abertura de arco elétrico era realizada a partir de um botão de acionamento externo (manual).

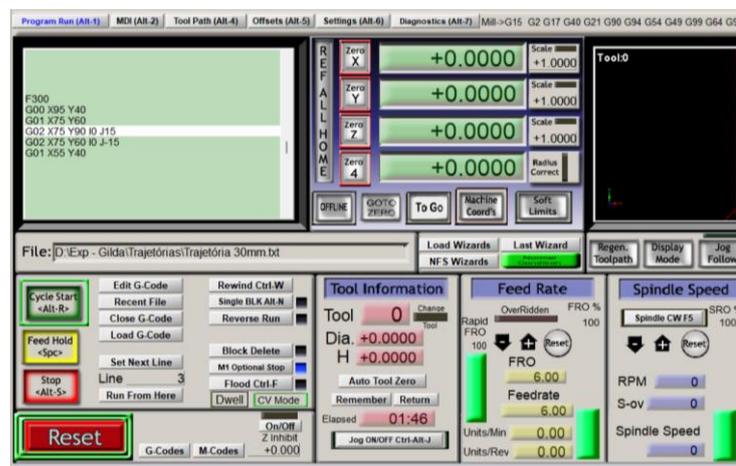
Para a movimentação da CNC foi utilizado o software *Mach 3*® e programação no código G, onde cada CP teve sua trajetória definida com base no diâmetro definido para cada peça, ilustrado na Figura 8.

Figura 7 - CNC GL-3020



Fonte: Autoria própria

Figura 8 - Software MACH 3



Fonte: Autoria própria

3.3.3 Delimitação da trajetória

Para os experimentos, foi delimitado a trajetória de modo que o ponto de abertura e fechamento de arco se mantivesse fora da sessão tubular. Essa alteração se fez necessária para que a diferença de altura não influenciasse tanto na geometria principal da peça, já que, devido às limitações dos equipamentos utilizados, o controle de sobreposição da trajetória durante a soldagem foi dificultado.

Figura 9 - Apêndice com ponto de abertura e fechamento de arco



Fonte: Autoria Própria

3.4 Equipamentos de aquisição de dados:

Para a captura e análise dos dados de temperatura, tensão, corrente e velocidade de alimentação, foi utilizado o equipamento de instrumentação IMC® SAP V4Ti junto ao software SAPTiV4.35s apresentados nas figuras 10 e 11.

Figura 10 - Sistema de aquisição de dados SAP



Fonte: Autoria própria

Figura 11 - Software SAPTIV4.35s



Fonte: Autoria própria

3.4.1 Sensores termopar

Para a verificação da temperatura do processo de deposição, foram utilizados termopares tipo K soldados no substrato de cada corpo de prova.

Os termopares foram soldados com a mesma distância em todos os corpos de prova: a 1 cm de distância da borda, no meio da chapa (longitudinalmente).

3.4.2 Metodologia para aquisição de temperatura interpasse

Para a medição de temperatura a cada camada, foi utilizado o termômetro infravermelho digital da marca *Minipa*® MT-350, mostrado na Figura 12.

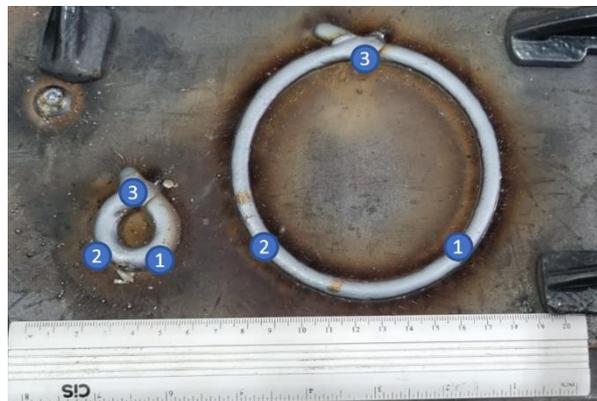
Figura 12 - Termômetro infravermelho



Fonte: Autoria própria

Foram definidos 3 pontos de medição da temperatura de modo que houvesse uma aferição média de todo o cordão:

Figura 13 - Pontos de aferição de temperatura



Fonte: Autoria própria

3.5 Inspeção e análise

Para dados mais precisos das dimensões das peças, utilizou-se o GOM ATOS Triplescam (mostrado na Figura 13), localizado no INDT (Instituto Nacional de Desenvolvimento Tecnológico). Esse equipamento se trata de um digitalizador 3D óptico de alta resolução que fornece dados de medição tridimensionais.

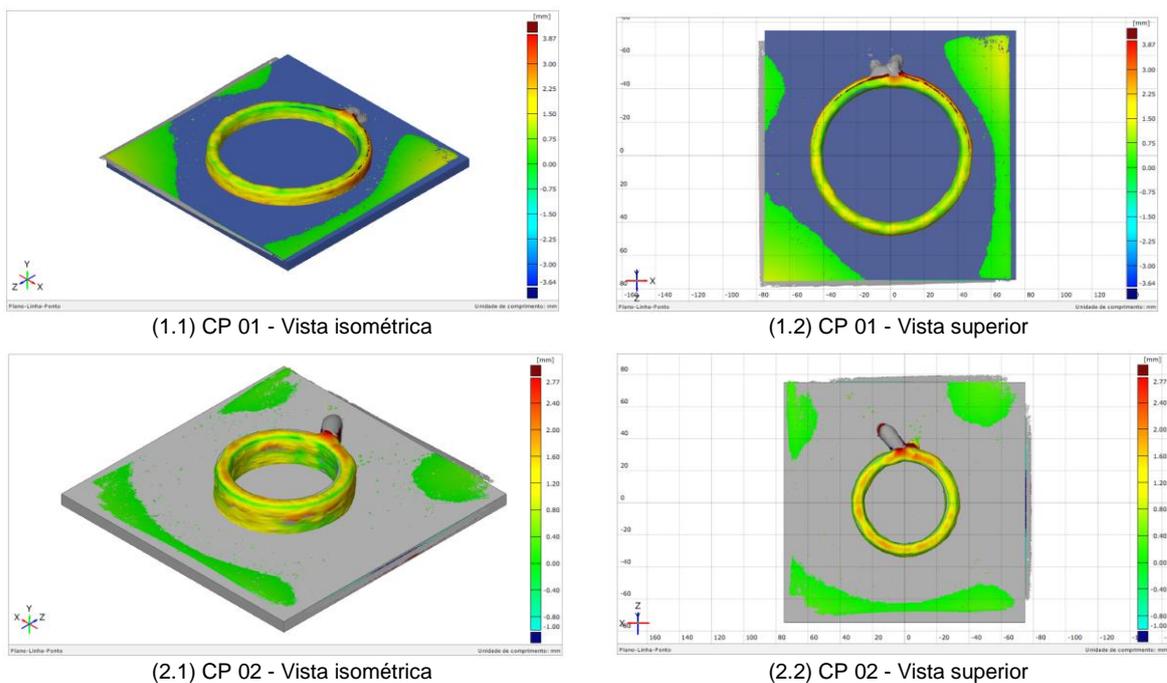
Figura 14 - GOM ATOS Triplescam



Fonte: Autoria própria

Nesse equipamento os corpos de prova foram escaneados, e posteriormente transformados em malha e inspecionados através do software GOM Inspect, onde foram comparados com um modelo CAD 3D que simulava uma peça padrão pós usinagem, de forma que os pudesse ser elaborado um relatório de superfícies de comparação entre os dois modelos.

Figura 15 - Exemplos de relatório de inspeção - GOM INSPECT



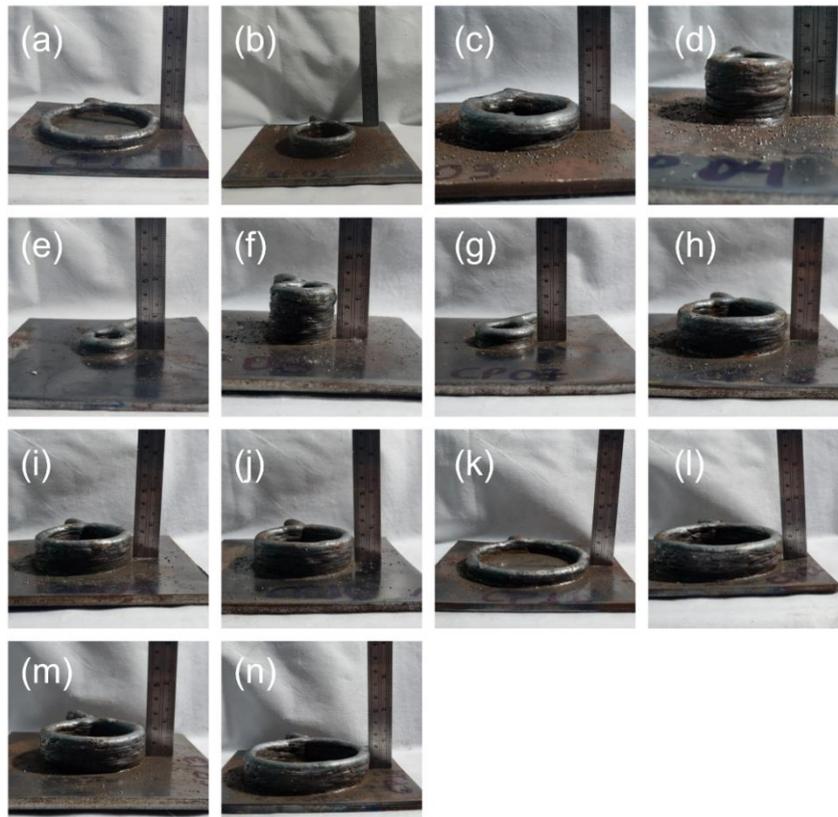
Para a inspeção e comparação da altura, foram definidos 9 pontos de inspeção divididos de acordo com o perímetro da sessão e comparados com a altura da peça padrão.

4 RESULTADOS E DISCUSSÕES

4.1 Confeção dos corpos de prova

Foi realizada a soldagem de 14 corpos de prova, mostrados nas figuras abaixo:

Figura 16 - Vista lateral dos corpos de prova – (a) CP01, (b) CP02, (c) CP03, (d) CP04, (e) CP05, (f) CP06, (g) CP07, (h) CP08, (i) CP09, (j) CP10, (k) CP11, (l) CP12, (m) CP13, (n) CP14



Fonte: Autoria Própria

Figura 17- Vista superior dos corpos de prova – (a) CP01, (b) CP02, (c) CP03, (d) CP04, (e) CP05, (f) CP06, (g) CP07, (h) CP08, (i) CP09, (j) CP10, (k) CP11, (l) CP12, (m) CP13, (n) CP14



Fonte: Autoria Própria

4.2 Dificuldades de construção e Análise

- Deslocamento da trajetória: durante a construção, alguns corpos de prova apresentaram variação geométrica durante a soldagem, com deslocamento do cordão de solda. Houve dificuldade do uso da CNC com a tocha acoplada para fabricação de peças de caminho fechado.

Figura 18 - Deslocamento do cordão

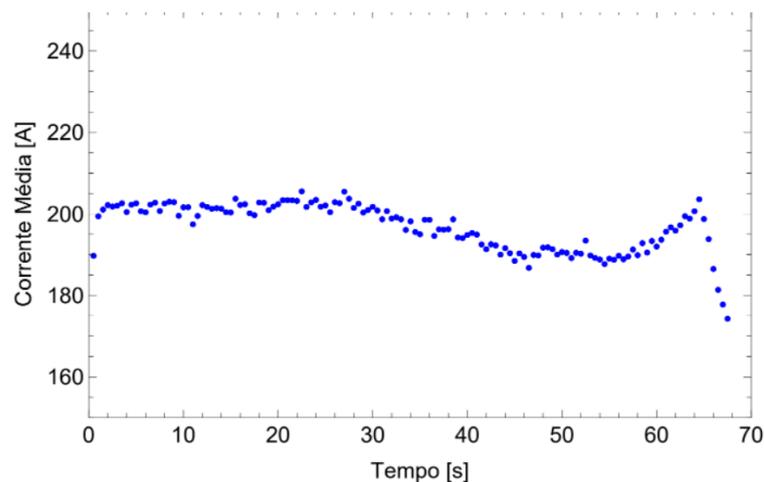


Fonte: Autoria própria

Algumas causas possíveis foram estudadas para esse deslocamento e, entre elas, é importante citar que durante a soldagem, devido à altura do ponto de fechamento do arco ser menor que o resto do cordão, nessa região havia um aumento considerável do DBCP e, conseqüentemente, do comprimento do arame. Quando se dava continuidade na trajetória com o arco fechado, o arame arrastava na chapa, gerando um deslocamento da tocha.

Pode-se observar no gráfico mostrado na Figura 19 que próximo ao fechamento do cordão há uma diminuição significativa da corrente. Isso acontece devido a diferença de altura que ocorria naquela região.

Figura 19 - Gráfico corrente média X tempo



Fonte: Autoria própria

- Os dados da maleta para aquisição de parâmetros de soldagem foram corrompidos, deixando disponíveis apenas os dados de 4 CP's – logo, os

dados de soldagem obtidos e as análises feitas a partir dele não se tornaram conclusivos pela pequena amostragem utilizada para análise estatística.

- Nos CP's 12 e 14, que, segundo o delineamento, possuem o diâmetro de 90 mm e 15 camadas de deposição, não foi possível concluir o experimento até a camada final. Para os dois CP's o experimento foi pausado na 11ª e 10ª camada, respectivamente. Isso aconteceu devido ao grande tempo de deposição de solda, que gerou acúmulo de respingo no bocal. Entretanto, devido as condições de acoplamento da tocha na CNC, não foi possível pausar o experimento para limpá-lo pois corria um alto risco de deslocamento da tocha, e conseqüentemente um deslocamento da trajetória.

4.3 Resultados das análises

Através do software *Minitab*®, foi realizada uma análise de regressão, que descreve a relação estatística entre uma ou mais preditoras e a variável de resposta e prediz novas observações sobre o modelo.

Primeiramente, foi realizado uma análise dos dados de Altura média (Hm) dos corpos de prova através da medição com o paquímetro:

4.3.1 Análise da altura média (Hm) – medição de peça física com paquímetro:

Tabela 4 - sumário do modelo para Hm (paq.)

S	R2	R2(aj)	PRESQ	R2(pred)	AICc	BIC
1,98234	95,04%	90,78%	284,352	48,68%	93,99	70,30

Fonte: Autoria própria

Onde temos que cada estatística da tabela anterior, segundo o *Minitab*®, correspondem a:

S: representa o desvio padrão da distância entre os valores dos dados e os valores ajustados. Quanto mais baixo for o valor de S, melhor o modelo descreve a resposta.

R²: representa a porcentagem de variação na resposta que é explicada pelo modelo. Pode aumentar de acordo com a quantidade de variáveis. Quanto mais alto o valor de R² melhor o modelo ajusta seus dados

R² (aj): O R² ajustado é a porcentagem de variação na resposta que é explicada pelo modelo, ajustada para o número de preditores do modelo em relação ao número de observações. O valor de R² ajustado incorpora o número de preditores no modelo para ajudá-lo a escolher o modelo correto.

R² predito: Determina o quão bem seu modelo prediz as respostas para novas observações. Um R² predito que é substancialmente menor que o R² pode indicar que o modelo está com excesso de ajuste, que significa que foi adicionado termos para efeitos que não são importantes na população. Quanto maior o valor de R² predito, mais elevado é a capacidade preditiva do modelo.

Os valores indicados na tabela através do R² e R² ajustado indicam que o modelo possui uma boa capacidade preditiva e de ajuste de dados. Porém, o valor de R² (predito), como apresentou um valor mais baixo, indica que o modelo provavelmente está com mais variáveis do que deveria ter.

Tabela 5 - Análise de variância da Hm (paq.)

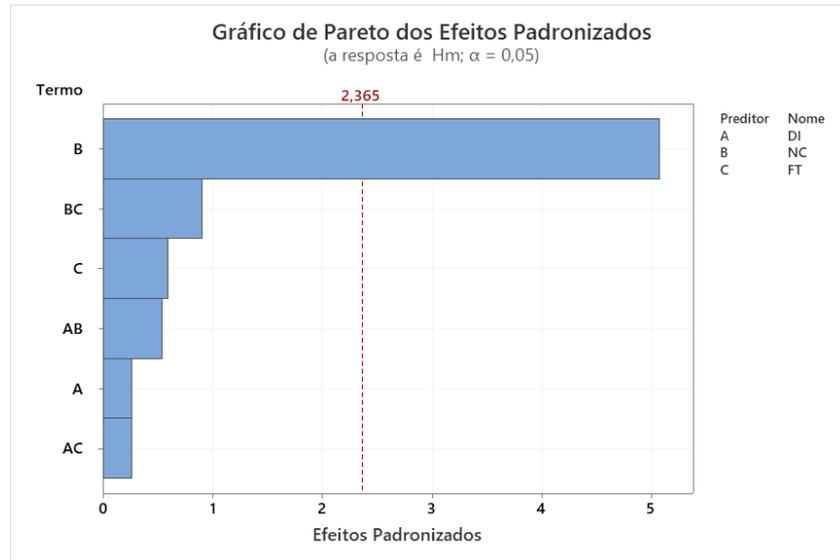
Fonte	GL	SQ Seq	Contribuição	SQ (Aj.)	QM (Aj.)	Valor F	Valor-P
Regressão	6	526,527	95,04%	526,527	87,755	22,33	0,000
DI	1	20,480	3,70%	0,271	0,271	0,07	0,800
NC	1	498,295	89,94%	101,254	101,254	25,77	0,001
FT	1	2,387	0,43%	1,366	1,366	0,35	0,574
DI*NC	1	1,064	0,19%	1,160	1,160	0,30	0,604
DI*FT	1	1,079	0,19%	0,270	0,270	0,07	0,801
NC*FT	1	3,223	0,58%	3,223	3,223	0,82	0,395
Erro	7	27,508	4,96%	27,508	3,930		
Falta de ajuste	3	17,634	3,18%	17,634	5,878	2,38	0,210
Erro puro	4	9,873	1,78%	9,873	2,468	*	*
Total	13	554,035	100,00%				

Fonte: Autoria própria

Na análise de variância, pode-se observar que, para o modelo de experimento aqui utilizado, a variável NC (número de camadas) aparenta ser a mais significativa, possuindo 89,94% de contribuição.

Essa observação se confirma quando verificado o valor-P. Quando o valor está abaixo de 0.05, a variável em questão está sendo significativa para o modelo e, para a análise dos valores indicados, apenas a variável NC corresponde ao valor indicado.

Figura 20- gráfico de Pareto para Hm (paq.)



Fonte: Autoria própria

Essa informação se torna ainda mais suscinta quando se observa o gráfico de Pareto, onde a única variável que cruza a linha de referência é a NC (número de camadas), mostrando que esta é estatisticamente significativa para o modelo de estudo atual. Para comprovar e retirar as variáveis que não influenciam na capacidade preditiva e explicativa do modelo estudado, é realizada a Stepwise Selection.

4.3.2 Altura média (Hm) após Stepwise Selection

Sumário do Modelo

Tabela 6- sumário do modelo - Hm após SS

S	R2	R2(aj)	PRESQ	R2(pred)	AICc	BIC
1,77011	93,21%	92,65%	54,7511	90,12%	61,96	61,48

Fonte: Autoria própria

Comparando os valores de R2 e R2 (aj) antes e após o Stepwise Selection, observa-se que houve um aumento, porém a maior alteração aconteceu no

valor de R² (pred), que aumentou de 48,68% para 90,12%, indicando maior capacidade preditiva do modelo após a exclusão de variáveis.

Tabela 7 - Análise de variância - Hm (paq.) após SS

Fonte	GL	SQ Seq	Contribuição	SQ (Aj.)	QM (Aj.)	Valor F	Valor-P
Regressão	1	516,436	93,21%	516,436	516,436	164,82	0,000
NC	1	516,436	93,21%	516,436	516,436	164,82	0,000
Erro	12	37,599	6,79%	37,599	3,133		
Falta de ajuste	8	27,726	5,00%	27,726	3,466	1,40	0,394
Erro puro	4	9,873	1,78%	9,873	2,468	*	*
Total	13	554,035	100,00%				

Fonte: Autoria própria

Figura 21 - Gráfico de Pareto - Hm (paq.) após SS



Fonte: Autoria própria

Observando a análise de variância e o gráfico de Pareto, a única variável que apresenta influência é a NC.

Portanto, realizando a análise estatística para a altura média é possível chegar em um modelo para o delineamento apresentado, mas ele é um modelo trivial, já que não houve influência de nenhum dos outros parâmetros utilizados (faixa de temperatura interpasse e diâmetro da sessão).

4.3.3 Análise da altura média (Hm) – medição de peça através do relatório no Scanner 3D

Outra análise de regressão linear foi realizada, dessa vez analisando os dados de altura média medidas através da inspeção 3D.

Tabela 8 - Sumário do modelo (Hm - scanner)

S	R2	R2(aj)	PRESQ	R2(pred)	AICc	BIC
1,90295	94,07%	92,10%	81,2118	85,23%	67,41	61,67

Fonte: Autoria própria

Em comparação à análise anterior (Hm – paquímetro), observa-se:

Tabela 9 - Comparação Hm (paq.) vs Hm (scanner)

	HM (PAQUÍMETRO)	HM (SCANNER)	OBS.
S	1,98234	1,90925	Menor desvio padrão – modelo descreve bem a resposta
R2	95,04%	94,07%	-
R2 (AJ)	90,78%	92,10%	-
R2 (PRED)	48,68%	85,23%	Maior R2 predito – melhor capacidade produtiva

Fonte: Autoria própria

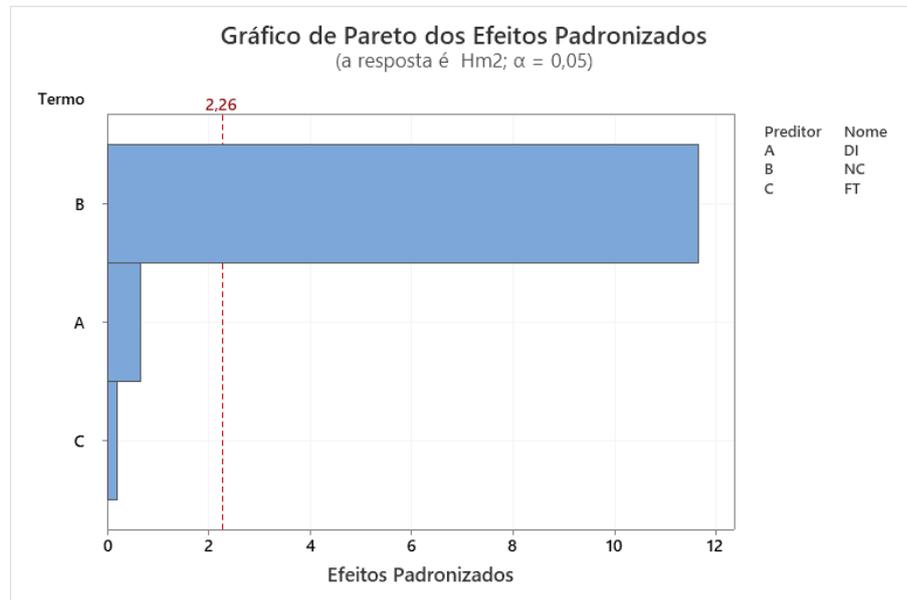
Tabela 10 - Análise de variância de Hm (scanner)

Fonte	GL	SQ Seq	Contribuição	SQ (Aj.)	QM (Aj.)	Valor F	Valor-P
Regressão	3	517,319	94,07%	517,319	172,440	47,62	0,000
DI	1	23,014	4,19%	1,559	1,559	0,43	0,528
NC	1	494,178	89,87%	492,722	492,722	136,07	0,000
FT	1	0,127	0,02%	0,127	0,127	0,04	0,856
Erro	9	32,591	5,93%	32,591	3,621		
Falta de ajuste	6	24,278	4,41%	24,278	4,046	1,46	0,407
Erro puro	3	8,312	1,51%	8,312	2,771	*	*
Total	12	549,910	100,00%				

Fonte: Autoria própria

Na análise de variância, a variável NC (número de camadas) também é a mais significativa, possuindo 89,87% de contribuição e um valor-P abaixo de 0,05.

Figura 22 - Gráfico de Pareto para Hm (scanner)



Fonte: Autoria própria

Assim como na análise anterior, a única variável que cruza a linha de referência é a NC, mostrando que esta é estatisticamente significativa para o modelo de estudo atual.

4.3.4 Altura Média (Hm - scanner) após o Stepwise Selection

Figura 23 - Sumário do modelo (Hm - Scanner) após SS

S	R2	R2(aj)	PRESQ	R2(pred)	AICc	BIC
1,76549	93,77%	93,20%	54,5666	90,08%	58,17	57,19

Fonte: Autoria própria

As maiores alterações antes e depois da Stepwise Selection, aconteceram no valor de R2 (pred), que aumentou de 85,23% para 90,08%, indicando maior capacidade preditiva do modelo após a exclusão de variáveis.

Além disso, houve uma diminuição no desvio padrão, indicando que o modelo descreve bem a resposta.

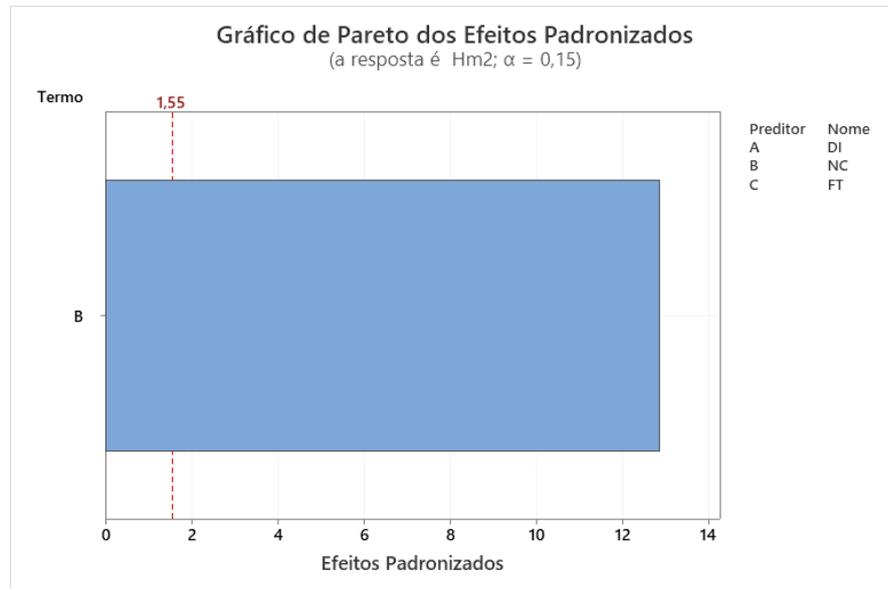
Tabela 11 - Análise de variância (Hm scanner) após SS

Fonte	GL	SQ Seq	Contribuição	SQ (Aj.)	QM (Aj.)	Valor F	Valor-P
Regressão	1	515,623	93,77%	515,623	515,623	165,43	0,000

NC	1	515,623	93,77%	515,623	515,623	165,43	0,000
Erro	11	34,286	6,23%	34,286	3,117		
Falta de ajuste	8	25,974	4,72%	25,974	3,247	1,17	0,497
Erro puro	3	8,312	1,51%	8,312	2,771	*	*
Total	12	549,910	100,00%				

Fonte: Autoria própria

Figura 24 - Gráfico de Pareto Hm scanner após SS



Fonte: Autoria própria

Chega-se ao mesmo resultado da análise que a altura média medida pelo paquímetro, onde, observando a análise de variância e o gráfico de Pareto, a única variável que apresenta influência é a NC.

Portanto, realizando a análise estatística para a altura média é possível chegar em um modelo para o delineamento apresentado, mas ele é um modelo trivial, onde as variáveis faixa de temperatura e diâmetro da sessão não mostraram influência.

4.3.5 Análise de espessura Média (Em)

Tabela 12 - Sumário do modelo Em

S	R2	R2(aj)	PRESQ	R2(pred)	AICc	BIC
0,860751	10,81%	0,00%	16,9921	0,00%	48,32	44,02

Fonte: Autoria própria

Análise de Variância

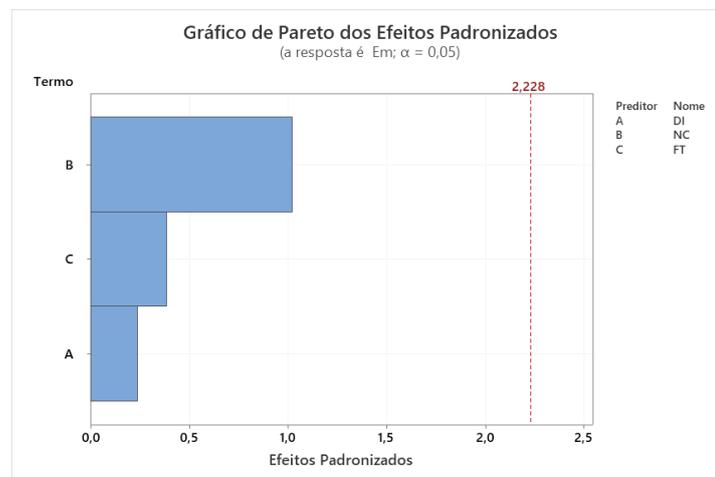
Tabela 13 - Análise de variância Em

Fonte	GL	SQ Seq	Contribuição	SQ (Aj.)	QM (Aj.)	Valor F	Valor-P
Regressão	3	0,89801	10,81%	0,89801	0,29934	0,40	0,753
DI	1	0,00087	0,01%	0,04155	0,04155	0,06	0,818
NC	1	0,78719	9,48%	0,77331	0,77331	1,04	0,331
FT	1	0,10995	1,32%	0,10995	0,10995	0,15	0,708
Erro	10	7,40892	89,19%	7,40892	0,74089		
Falta de ajuste	6	5,49410	66,14%	5,49410	0,91568	1,91	0,276
Erro puro	4	1,91481	23,05%	1,91481	0,47870	*	*
Total	13	8,30692	100,00%				

Fonte: Autoria própria

Observando os valores, temos R2 (aj) e R2 (pred) zerados e um R2 com valor bem baixo, o que caracteriza um modelo com baixa capacidade preditiva.

Figura 25 - Gráfico de Pareto Em



Fonte: Autoria própria

Analisando o gráfico de Pareto, também fica claro que não há nenhuma variável estudada (número de camadas, faixa de temperatura interpasse e diâmetro da sessão) que influencie na espessura.

Portanto, não foi possível chegar em um modelo com essas variáveis que explica alguma variabilidade da resposta do sistema.

5 CONCLUSÃO E TRABALHOS FUTUROS

Com as análises realizadas, pode-se concluir que, para o delineamento utilizado neste trabalho, o modelo estatístico encontrado foi trivial, não mostrando influência da faixa de temperatura ou do diâmetro do tubo, dentro da faixa utilizada para os experimentos, na altura das peças.

Entretanto, sabe-se que a temperatura de interpasse, além de afetar a geometria, pode afetar significativamente a microestrutura do material. Para trabalhos futuros, pode-se realizar uma análise microestrutural dos Corpos de Prova utilizados nessa dissertação para averiguar seu comportamento.

Além disso, levando em consideração a influência dos parâmetros de soldagem na geometria dos cordões, pode-se realizar um estudo na variação desses parâmetros a fim de se buscar um modelo estatístico distinto.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

ALCALDE, E.; WILTGEN, F., **Estudo das tecnologias em prototipagem rápida: passado, presente e futuro**, Revista de Ciências Exatas da Universidade de Taubaté, Taubaté, v. 24, n. 2, p. 12-20, 2018.

ESAB, **Apostila de soldagem MIG/MAG**. 2005.

ISO, B. S. ASTM 52900: 2015. **Additive manufacturing—general principles—terminology**. London: BSI Standards Limited, 2016.

HU, Zeqi *et al.* Understanding and overcoming of abnormality at start and end of the weld bead in additive manufacturing with GMAW. **The International Journal Of Advanced Manufacturing Technology**, [s.l.], v. 95, n. 5-8, p.2357-2368, 22 nov. 2017. Springer Nature. <http://dx.doi.org/10.1007/s00170-017-1392-9>.

XIONG, Jun; YIN, Ziqiu; ZHANG, Weihua. Forming appearance control of arc striking and extinguishing area in multi-layer single-pass GMAW-based additive manufacturing. **The International Journal Of Advanced Manufacturing Technology**, [s.l.], v. 87, n. 1-4, p.579-586, 27 fev. 2016. Springer Nature. <http://dx.doi.org/10.1007/s00170-016-8543-2>.

Yang, D., Wang, G., & Zhang, G. (2017). **Thermal analysis for single-pass multi-layer GMAW based additive manufacturing using infrared thermography**. *Journal of Materials Processing Technology*, 244, 215–224. doi:10.1016/j.jmatprotec.2017.01.

Da Silva, L.J.; Ferraresi, H.N.; Araújo, D.B.; Reis, R.P.; Scotti, A. **Effect of Thermal Management Approaches on Geometry and Productivity of Thin-Walled Structures of ER 5356 Built by Wire + Arc Additive Manufacturing**. *Coatings* 2021, 11, 1141. <https://doi.org/10.3390/coatings11091141>

M. Gierth, P. Henckell, Y. Ali, J. Scholl, and J. P. Bergmann, “**Wire Arc Additive Manufacturing (WAAM) of aluminum alloy AlMg5Mn with energy-reduced Gas Metal Arc Welding (GMAW)**,” *Materials*, vol. 13, no. 12, pp. 1–22, Jun. 2020, doi: 10.3390/ma13122671.

MARTINA, F; WILLIAMS, S. **Wire+Arc Additive Manufacturing vs. Traditional Machining From Solid: A Cost Comparison**, Cranfield University, 2015, 27p.

Silva, Bruno Henrique Sousa, 1992 - **Avaliação e Aplicabilidade de Arame Ultrafino em Manufatura Aditiva por Deposição a Arco (MADA) [recurso eletrônico]** / Bruno Henrique Sousa Silva. – 2020 Orientador: Louriel Oliveira Vilarinho. Dissertação (Mestrado) – Universidade Federal de Uberlândia, Pós-graduação em Engenharia Mecânica. Modo de acesso: Internet. Disponível em: <http://doi.org/10.14393/ufu.di.2020.279>

Da Silva, L. J., Souza, D. M., de Araújo, D. B., Reis, R. P., & Scotti, A. (2020). **Concept and validation of an active cooling technique to mitigate heat accumulation in WAAM**. *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*. doi:10.1007/s00170-020-05201-4

ALLGAYER, Alexandre André. **Caracterização das propriedades mecânicas e metalúrgicas de uma junta de aço Astm A36 soldado pelo processo de arco submerso (SAW) com diferentes aportes térmicos**. 2017. Monografia (Graduação

em Engenharia Mecânica) – Universidade do Vale do Taquari - Univates, Lajeado, 07 jul. 2017. Disponível em: [ttp://hdl.handle.net/10737/1667](http://hdl.handle.net/10737/1667).

YANG, D., WANG, G., ZHANG, G., 2017. **Thermal analysis for single-pass multi-layer GMAW based additive manufacturing using infrared thermography.** J. Mater. Process. Technol. 244, 215–224.