

**INSTITUTO FEDERAL DE EDUCAÇÃO, CIÊNCIA E TECNOLOGIA DE
SANTA CATARINA – CÂMPUS FLORIANÓPOLIS
DEPARTAMENTO ACADÊMICO DE METAL MECÂNICA
CURSO DE GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA MECATRÔNICA**

LUCA ALFARO RAMPINELLI

**TECNICAS DE RESFRIAMENTO DO CORDÃO NA MANUFATURA
ADITIVA POR SOLDAGEM A ARCO**

FLORIANÓPOLIS, 2022.

**INSTITUTO FEDERAL DE EDUCAÇÃO, CIÊNCIA E TECNOLOGIA DE SANTA
CATARINA – CÂMPUS FLORIANÓPOLIS
DEPARTAMENTO ACADÊMICO DE METAL MECÂNICA
CURSO DE GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA MECATRÔNICA**

LUCA ALFARO RAMPINELLI

**TECNICAS DE RESFRIAMENTO DO CORDÃO NA MANUFATURA
ADITIVA POR SOLDAGEM A ARCO**

Trabalho de Conclusão de Curso submetido
ao Instituto Federal de Educação, Ciência e
Tecnologia de Santa Catarina como parte
dos requisitos para obtenção do título de
Engenheiro em Engenharia Mecatrônica.

Orientadores:

Prof. Erwin Werner Teichmann, Doutor

Prof. Nelso Gauze Bonacorso, Doutor

FLORIANÓPOLIS, 2022.

Ficha de identificação da obra elaborada pelo autor.

Rampinelli, Luca

TECNICAS DE RESFRIAMENTO DO CORDÃO NA MANUFATURA

ADITIVA POR SOLDAGEM A ARCO / Luca Rampinelli; orientação de Erwin Werner Teichmann; coorientação de Nelso Gauze Bonacorso. - Florianópolis, SC, 2022.

52 p.

Trabalho de Conclusão de Curso (TCC) - Instituto Federal de Santa Catarina, Câmpus Florianópolis. Bacharelado em Engenharia Mecatrônica. Departamento Acadêmico de Metal Mecânica.

Inclui Referências.

1. Manufatura aditiva. 2. Resfriamento de solda.

3. Automação de soldagem. 4. Soldagem aditiva. I. Werner Teichmann, Erwin. II. Gauze Bonacorso, Nelso. III. Instituto Federal de Santa Catarina. IV. TECNICAS DE RESFRIAMENTO DO CORDÃO NA MANUFATURA ADITIVA POR SOLDAGEM A ARCO .

TECNICAS DE RESFRIAMENTO DO CORDÃO NA MANUFATURA ADITIVA POR SOLDAGEM A ARCO

LUCA ALFARO RAMPINELLI

Este trabalho foi julgado adequado para obtenção do título de Engenheiro em Engenharia mecatrônica e aprovado na sua forma final pela banca examinadora do Curso de Engenharia Mecatrônica do Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia de Santa Catarina.

Florianópolis, 18 de Agosto, 2022.

Banca Examinadora:



ERWIN WERNER TEICHMANN:
74409506900
CN=ERWIN WERNER TEICHMANN:
74409506900, OU=IFSC - Instituto Federal
de Santa Catarina, O=ICPEdu, C=BR
IFSC - Campus Florianópolis
2022-08-24 17:08:07

Erwin Werner Teichmann, Orientador



Documento assinado digitalmente

NELSO GAUZE BONACORSO
Data: 22/08/2022 23:50:41-0300
Verifique em <https://verificador.iti.br>

Nelso Gauze Bonacorso, Coorientador

MAIRON FIGUEIREDO

MARQUES:05823837
909

Digitally signed by MAIRON
FIGUEIREDO
MARQUES:05823837909
Date: 2022.08.22 07:41:55 -03'00'

Mairon Figueiredo Marques, Mestre

RAUL GOHR

JUNIOR:45530122949

Assinado de forma digital por
RAUL GOHR JUNIOR:45530122949
Dados: 2022.08.19 17:30:49 -03'00'

Raul Gohr Jr., Doutor

Este trabalho é dedicado a todos os familiares, amigos e professores que permitiram que este fosse possível.

AGRADECIMENTOS

Agradeço aos meus pais, Otto e Lucrecia, e à minha irmã, Bianca, pelo apoio e todas as horas dedicadas para que os últimos 5 anos de graduação fossem possíveis.

Também agradeço à minha madrinha, Márcia, por ceder sua residência todos esses anos, pela convivência no dia a dia e pelas ajudas nas matérias de cálculo.

Ao orientador e coorientador Erwin e Nelso, respectivamente, que sempre se fizeram disponíveis quando surgiram necessidades ou empecilhos durante o decorrer do projeto.

Ao Prof. Adriano de Andrade Bresolin, chefe do projeto ANEEL/CELESC/EMBRAPII/IFSC “Inserção de Veículos Elétricos em Frotas Públicas, através da Conversão de Veículos a Combustão Para Tração Elétrica”, pela doação da bobina de arame de alumínio usada no projeto.

Ao engenheiro de serviços na *FANUC South América*, Rulio Siefert Sera, cuja assistência técnica gratuita foi fundamental para ressuscitar o robô FANUC. E também agradeço por ceder seu tempo em participar da banca.

Ao Sr. Lohan Licht Canhola, técnico da empresa Vandersoldas Ltda, pela assistência e manutenção do robô FANUC.

Ao grupo GD+ e seus integrantes por ceder uma sala com computadores e armários para guardar os equipamentos utilizados.

Ao ilustre amigo e companheiro de curso, Leonardo José, pela companhia diária e pelo auxílio prestado durante o desenvolvimento do trabalho realizado.

Aos bolsistas do almoxarifado e técnicos do laboratório de Maquinas Operatrizes, em especial ao Charles, Fagney e Giovani, pelo auxílio no uso dos equipamentos no decorrer deste trabalho.

A todos os colegas e novas amizades que surgiram durante o curso e que percorreram comigo todos esses anos. Destas pessoas, agradecimentos especiais aos integrantes da nossa empresa fictícia Insane Projects, Ingon, Bruno e João, e aos companheiros Daniel e Everton pelas madrugadas que passamos em branco.

Nem mesmo os mais sábios
conseguem ver todos os fins

RESUMO

Devido aos avanços na área de fabricação de metais, a demanda e a busca pela redução do tempo de produção de peças, visando o aumento da produtividade, cresceram proporcionalmente. Dada a facilidade de automação dos processos de soldagem, estes começaram a ser utilizados de várias maneiras a ponto de possibilitar a produção de peças através da deposição de cordões de solda um sobre o outro, processo também conhecido como manufatura aditiva com arco elétrico e arame (WAAM - Manufatura Aditiva por Deposição a Arco). A manufatura aditiva pode ser implementada de várias maneiras, desde o uso de compósitos plásticos FDM (*Fused Deposition Modeling*), sinterização a laser, solda a plasma e MIG/MAG (*Metal Inert e Metal Active Gas Welding*). O processo de soldagem MIG/MAG aditiva, devido à alta potência do arco elétrico, libera uma grande quantidade de calor que, se não for tratada adequadamente, pode comprometer a peça. A solução proposta visa utilizar um bocal de gás dedicado, para a saída de CO₂ (dióxido de carbono) responsável pelo resfriamento da peça a ser fabricada. Este método aproveita a queda natural de temperatura que ocorre no gás devido a sua descompressão. Finalmente, os resultados obtidos são comparados com o processo de fabricação equivalente, com resfriamento por ar comprimido e sem resfriamento forçado. Este trabalho pretende comparar entre os processos de resfriamento propostos e seu impacto na qualidade e geometria da peça produzida.

Palavras-chave: Manufatura aditiva. Resfriamento de solda. Automação de soldagem. Soldagem aditiva.

ABSTRACT

Due to the advances in the metal manufacturing area, the demand, and the search for the reduction of production time of parts, aiming at the increase of productivity, have grown proportionally. Given the ease of automation of the welding processes, these began to be used in various ways to the point of making possible the production of parts through the deposition of weld seams one on top of another, also known as Wire Arc Additive Manufacturing (WAAM). Additive manufacturing can be implemented in many ways, from the use of plastic composites FDM (Fused Deposition Modeling), laser sintering, plasma welding and MIG/MAG (Metal Inert and Metal Active Gas Welding). The MIG/MAG additive welding process, due to the high power of the electric arc, releases a large amount of heat that, if not properly treated, can compromise the part. The proposed solution aims to use a dedicated gas nozzle, for the output of CO₂ (carbon dioxide) responsible for cooling the part being manufactured. This method takes advantage of the natural temperature drop that occurs in the gas due to its decompression. Finally, the results obtained are compared with the equivalent manufacturing process, with compressed air cooling and without forced cooling. This work intends to compare between the proposed cooling processes and their impact on quality and geometry of the produced part.

Keywords: Additive Manufacturing. Weld Cooling. Welding Automation. Fused Wire Arc Additive Manufacturing.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 - Planta de WAAM resfriada com liquido	15
Figura 2 - Processo básico de soldagem MIG/MAG.....	18
Figura 3 - Exemplo impressora 3D FDM	20
Figura 4 - Gabarito para medição do DBCP	22
Figura 5 - Robô FANUC M10iA e Controladora R30iA	23
Figura 6 - Refrigeração, alimentador e fonte respectivamente	23
Figura 7 - Botijão de Argônio comprimido.....	24
Figura 8 - Geometria escolhida para manufatura	25
Figura 9 - Montagem vistas da camera térmica VT04A.....	25
Figura 10 - Teach Pedant	27
Figura 11 - Exemplo de marcação na carenagem do robô.....	27
Figura 12 - Tocha e tubo de resfriamento com adaptador de alumínio.....	28
Figura 13 – Cabo de força com rachaduras	29
Figura 14 - Cabos reparados e organizados	29
Figura 15 - Exemplo de rolete com cavidade em U de 1.2mm	30
Figura 16 - Exemplo de programa no TP	31
Figura 17 - Demonstração da trajetória gerada pelo programa	32
Figura 18 - Demonstração da lógica do programa de dois pontos	33
Figura 19 - Testes do programa de dois pontos	34
Figura 20 - Demonstração da lógica do programa de quatro pontos	35
Figura 21 - Teste programa de 4 pontos.....	35
Figura 22 - Diferença entre FINE e CNT	36
Figura 23 - Correção dos problemas no programa de 4 pontos	37
Figura 24 – Exemplo de parede irregular	37
Figura 25 - Exemplo de paredes regulares	38
Figura 26 - Resfriamento Passivo	40
Figura 27 - Resultado obtido no resfriamento passivo	40
Figura 28 - Resfriamento forçado com ar comprimido.....	41
Figura 29 - Resultado obtido no resfriamento a ar comprimido	42
Figura 30 - Resfriamento forçado com CO ₂	43
Figura 31 - Resultado obtido no resfriamento a CO ₂ comprimido	43
Figura 32 - Comparação dos resultados entre os métodos.....	44

Figura 33 - Comparação de temperatura entre os métodos.....	45
Figura 34 - Formação de gelo na valvula de duplo estágio	46
Figura 35 - Parâmetros usados na fonte de soldagem.....	47
Figura 36 - Imagem térmica	48
Figura 37 – Substrato com o verso pintado.....	49

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

GMAW	Gas Metal Arc Welding
MIG	Metal Inert Gas
MAG	Metal Active Gas
WAAM	Wire-Arc Additive Manufacturing
TP	Teach Pedant
PR	Position Register

SUMÁRIO

1	Introdução	15
1.1	Justificativa	16
1.2	Definição do Problema	16
1.3	Objetivo Geral.....	17
1.4	Objetivos Específicos	17
2	Fundamentação Teórica	18
2.1	Processo de soldagem MIG/MAG	18
2.2	Parâmetros de soldagem.....	19
2.3	Manufatura aditiva e soldagem.....	19
2.4	Resfriamento	20
3	Metodologia.....	22
4	Desenvolvimento.....	26
4.1	Reparo e adequação do maquinário.....	26
4.1.1	Controladora R30iA e FANUC M10iA.....	26
4.1.2	Alimentador automático de arame	30
4.2	Criando programa.....	30
4.2.1	Logica do programa	31
4.2.1.1	Programa com base em dois pontos	32
4.2.1.2	Programa com base em 4 pontos.....	34
4.3	Sobreposição de camadas	37
4.4	Aplicação dos métodos de resfriamento	38
5	Considerações Finais	39
5.1	Resultados obtidos	39
5.1.1	Resfriamento passivo.....	39
5.1.2	Resfriamento forçado com ar comprimido	41
5.1.3	Resfriamento forçado com CO2.....	42
5.2	Conclusão.....	44

5.3	Tempo de resfriamento e tempo de produção	45
5.4	Vazão de gás	46
5.5	Parâmetros de soldagem.....	46
5.6	Temperatura entre os passes de soldagem	47
5.7	Geometria das peças manufaturadas.....	49
5.8	Sugestões de melhoria para trabalhos futuros	49
	Referências	51

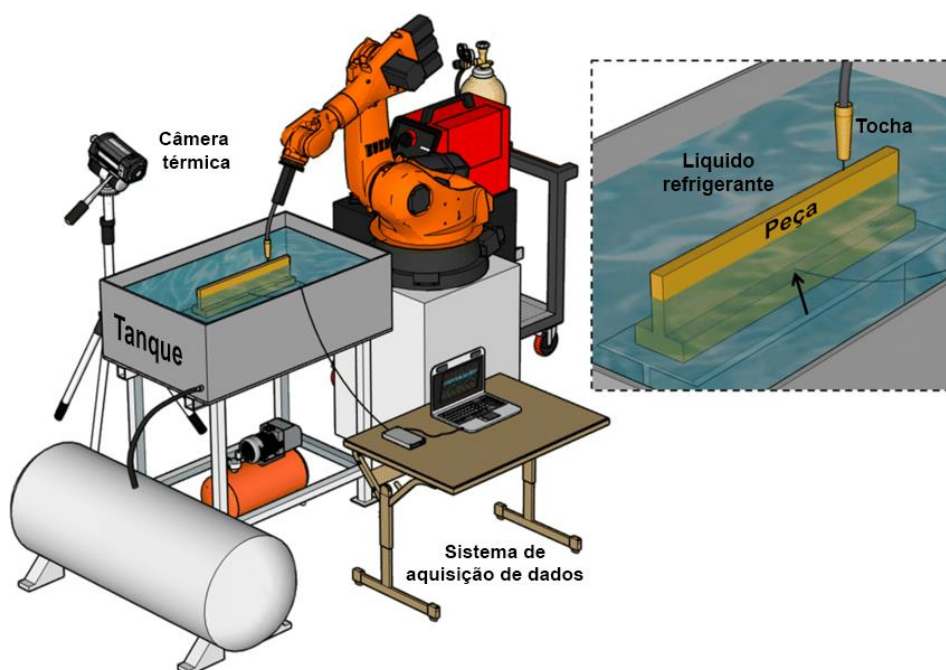
1 INTRODUÇÃO

A soldagem não está mais limitada a processos manuais e união entre diferentes componentes. Atualmente, como um processo facilmente automatizável, os processos de soldagem são frequentemente realizados por robôs, o que permitiu o avanço tecnológico na área da metalurgia e aumentou a produtividade do setor significativamente.

Com a superior complexidade de movimento, precisão e repetibilidade que um robô possui, novos métodos foram surgindo e refinados com o passar dos anos. Entre eles tem-se a manufatura aditiva, utilizando diversos materiais, desde alimentícios, polímeros até mesmo metais e não metais (ALBERTI, E. A. et al.). No âmbito da soldagem foi implementada a técnica de deposição de camadas para poder criar peças de geometrias complexas a partir de múltiplos cordões de solda, chamada de WAAM, ou traduzida para português, Manufatura Aditiva por Deposição a Arco.

No entanto, com a alta temperatura de fusão do eletrodo, alguns desafios surgiram, como o resfriamento das partes sendo manufaturadas. Alguns métodos foram propostos, como submersão em líquidos para sanar a questão da temperatura (Figura 1).

Figura 1 - Planta de WAAM resfriada com líquido



Fonte: SILVA, L. J. et al (2020, adaptado).

Porém, alguns métodos tornam-se complexos de executar ou até mesmo não possuem a eficiência necessária, acarretando em uma redução de produtividade, visto que é necessário aguardar a peça esfriar para poder continuar sua produção.

Este trabalho planeja desenvolver uma solução que use o gás CO₂ (dióxido de carbono) não como gás de proteção, mas sim como fluido refrigerante, sabendo que em sua descompressão ocorre uma brusca queda de temperatura. Por fim, será comparada a eficiência deste método com a patente, de número BR 10 2019 0057050, gerada pelo IFSC, o resfriamento forçado com ar comprimido, e com o resfriamento passivo por convecção natural do ar.

1.1 Justificativa

O dióxido de carbono é um gás, de baixo custo, comumente utilizado em processos de soldagem, no entanto, costuma ser utilizado como gás de proteção. A técnica desenvolvida faz uso deste gás, não como proteção, mas sim como refrigerante para a peça que está sendo manufaturada, uma vez que este absorve grandes quantidade de calor em sua expansão.

Este trabalho visa comparar o desempenho de estratégias de resfriamento passivo e forçado, onde, neste último, serão aplicando diferentes fluidos refrigerantes, sendo eles, o CO₂ e o ar comprimido. Com isso é espera-se elevar a velocidade de produção, melhorar o acabamento das peças produzidas, e reduzir o aporte térmico.

1.2 Definição do Problema

O resfriamento dos cordões de solda durante o processo de manufatura aditiva por soldagem é uma área pouco difundida que pode ter grande impacto em linhas de produção de média e grande escala. Durante a manufatura, a peça sendo produzida, recebe e retém o calor proveniente do arco elétrico durante a soldagem. Esse calor, se não tratado, com o tempo acaba se acumulando e afeta diretamente o resultado final da peça.

Para tratar o calor gerado e armazenado, costuma-se fazer a paralização da linha de produção por determinado período de tempo para que a peça resfrie naturalmente por irradiação e convecção. Em peças de grande porte, como tanques

de combustível de foguetes, o tempo de espera pode ser ainda maior, o que por sua vez, diminuí a produtividade e aumenta o custo de produção.

1.3 Objetivo Geral

Para a concretização do objetivo geral o maquinário será adaptado, para permitir a circulação do gás escolhido como refrigerante. Por fim, visa-se realizar uma peça para cada um dos métodos de resfriamento em questão e inspecioná-las para avaliar a viabilidade dos mesmos e compara-los um com os outros.

1.4 Objetivos Específicos

Serão comparados os diferentes resultados obtidos pelo método proposto, com seu equivalente usando apenas ar comprimido. Serão avaliados:

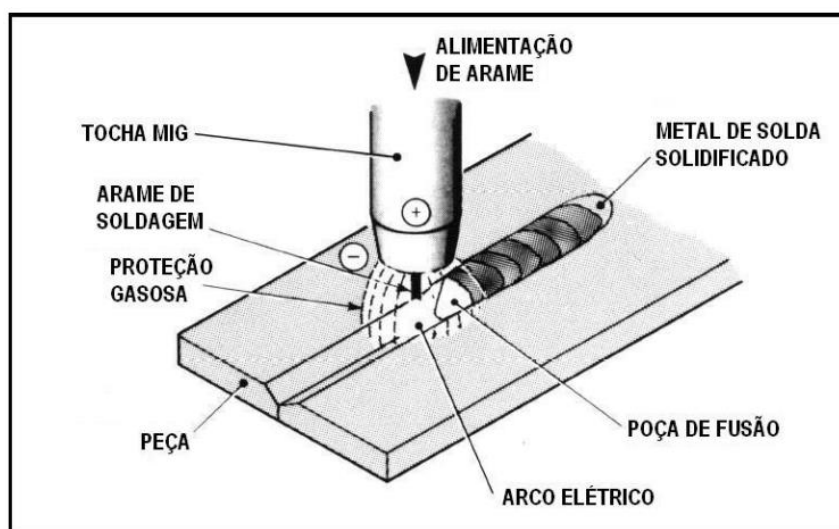
- a) Adaptar maquinário para permitir a circulação de gás;
- b) Analisar tempo utilizado para a produção e resfriamento da peça;
- c) Configurar parâmetros de soldagem;
- d) Aquisição de dados de temperatura entre os passes de soldagem;
- e) Definir geometria das peças a serem manufaturadas;
- f) Análise dos dados obtidos e avaliação das peças.

2 FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA

2.1 Processo de soldagem MIG/MAG

No processo GMAW (Gas Metal Arc Welding), ou MIG/MAG, um arco elétrico é produzido entre o substrato e o eletrodo. Devido à alta temperatura gerada pelo processo o eletrodo é consumido e depositado gradualmente à poça de fusão. A tocha, que guia o eletrodo, libera um gás de proteção, inerte ou ativo, que isola a poça de fusão da atmosfera externa. (ESAB, 2005).

Figura 2 - Processo básico de soldagem MIG/MAG



Fonte: ESAB (2016).

De acordo com Neris (2022) em processos GMAW o arco elétrico é formado durante a aproximação de dois eletrodos, arame e peça, que ao se aproximarem e em seguida afastarem faz com que a temperatura nas extremidades mais próximas dos dois eletrodos se eleve.

Os elétrons vindos do eletrodo negativo (cátodo) colidem com as moléculas e átomos do ar, desmembrando-os em íons e elétrons livres e tornando a fresta de ar um condutor de corrente devido à ionização. Isto mantém a corrente através do espaço de ar e sustenta o arco; na prática para acender o arco, o soldador esfrega a extremidade do eletrodo na peça a soldar e depois o afasta ligeiramente. No instante de contato, a corrente passa no circuito e continua a circular quando o eletrodo é afastado, formando um arco, devido ter acontecido a ionização do ar, isto é, o ar ter se tornado condutor de corrente. (NERIS, p. 2)

2.2 Parâmetros de soldagem

Durante processos GMAW podem ser usados arames que possuem diâmetro de 0,8 a 2,4 mm. “A soldagem MIG pode ser usada tanto na soldagem de ferrosos quanto de não ferrosos, como alumínio, cobre, magnésio, níquel e suas ligas.” (MARQUES; MODENESI; BRACARENSE, 2009, p. 234).

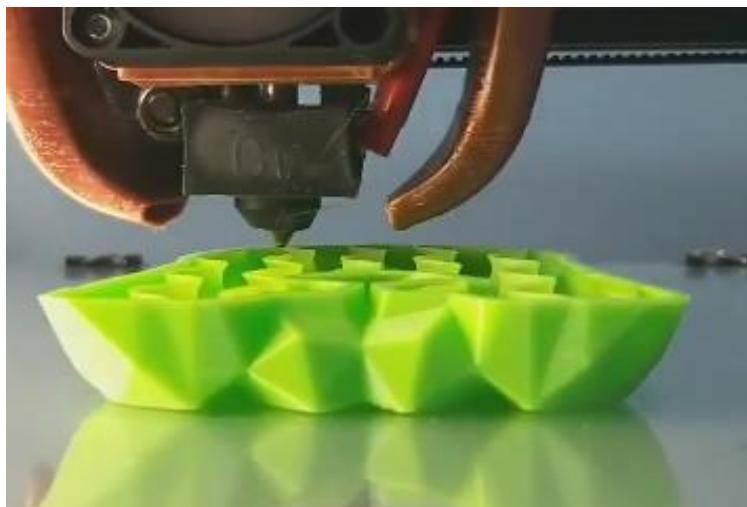
Esses processos possuem grande sensibilidade à variação dos parâmetros de soldagem que influenciam diretamente na qualidade do cordão de solda depositado. A sua qualidade é diretamente influenciada por fatores como velocidade do arame, tensão, comprimento do arco, velocidade de soldagem, gases de proteção, diâmetro do eletrodo e posição da tocha, entre outros.

Um cordão aplicado com baixas velocidades apresentará alta molhabilidade, por tanto, sua espessura será maior quando comparado com velocidades mais elevadas que produzem cordões mais altos e de espessura mais fina. Tensões elevadas causam porosidade e salpicos no cordão de solda, enquanto baixas tensões podem causar cordões convexos. Com isso pode-se perceber que a mínima variação de parâmetros pode afetar drasticamente o resultado final da soldagem.

2.3 Manufatura aditiva e soldagem

Durante a manufatura aditiva objetiva-se a sobreposição contínua de camadas para criar objetos que possuam volume. Um exemplo são as impressoras 3D, que utilizam a tecnologia FDM ou Modelagem por Deposição Fundida (do inglês *Fused Deposition Modeling*), onde finas camadas de filamento polimérico são depositadas umas sobre as outras a fim de gerar uma peça final, como pode ser observado na Figura 3.

Figura 3 - Exemplo impressora 3D FDM



Fonte: Autoria própria (2022).

Devido ao alto nível de robotização, diversos processos de soldagem já são utilizados para manufatura aditiva. Segundo Ding (2015), “o processo de WAAM é uma alternativa promissora quando comparada a manufatura subtrativa, principalmente para grandes componentes de foguetes espaciais”, pois trabalha com a deposição de cordões de solda um sobre o outro, reduzindo o tempo de produção, custo e desperdício de matéria prima. Esse processo também permite a construção de geometrias mais complexas, comparado com métodos tradicionais.

Graças a flexibilidade desse processo é possível realizar a prototipagem rápida de partes durante o desenvolvimento de um produto. Devido à alta velocidade de produção, quando comparado com métodos tradicionais, o processo de WAAM facilita a elaboração de protótipos, o que gera redução nos custos, aumenta a produtividade e permite a visualização mais clara de detalhes que muitas vezes podem ser difíceis de perceber, por exemplo, em um ambiente CAD. Todos esses fatores influenciam diretamente no valor final do produto, na sua qualidade, no lucro da empresa sobre o mesmo, uma vez que seus custos foram reduzidos.

2.4 Resfriamento

Mesmo em impressoras 3D de filamento polimérico o resfriamento é necessário para evitar o acúmulo excessivo de calor na peça sendo produzida. E o

mesmo vale para a soldagem aditiva. Durante a deposição de camadas, parte do calor gerado pelo arco elétrico permanece no cordão, que, por sua vez, transfere para a peça sendo produzida. Por tanto, a sobreposição contínua de camadas, gera uma grande concentração calor que, se não administrada, afetará o resultado final da produção.

Para o processo MIG, quanto maior a temperatura envolvida, maior a molhabilidade do cordão de solda. Assim, durante a deposição dos cordões, se a dissipação de calor do sistema for insuficiente, o resultado obtido será de camadas mais altas e finas no início do processo e camadas mais baixas e largas no final do mesmo. Isso acontece, pois, as camadas iniciais possuem maior proximidade com o substrato, geralmente uma chapa metálica, facilitando a dissipação do calor em camadas iniciais e dificultando a medida que novas são adicionadas.

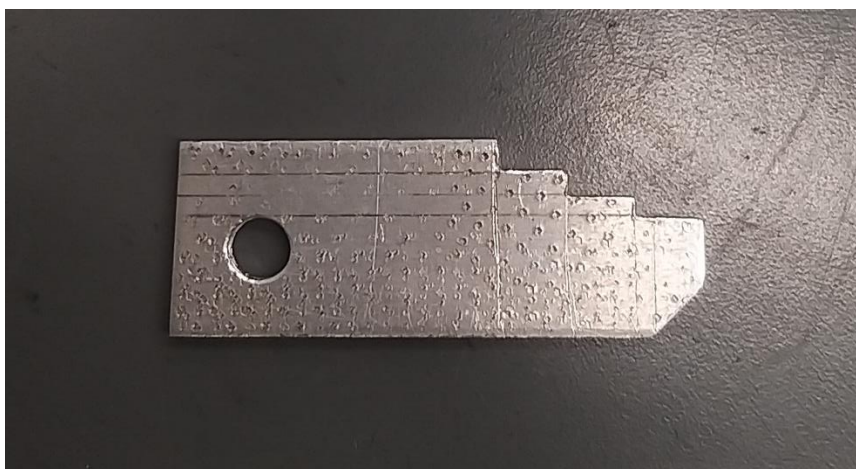
Como consequência, a concentração excessiva de calor, gera deformidades nos cordões, variando suas dimensões além de poder afetar a eficiência do arco elétrico e de aumentar a possibilidade de empenamento do substrato em que se está sendo soldado. Por esse motivo, busca-se novos métodos para a redução do calor armazenado durante a soldagem aditiva, que é justamente do que se trata este trabalho.

3 METODOLOGIA

Para o desenvolvimento deste trabalho, foram utilizadas as instalações do IFSC e alguns de seus laboratórios como LAM (Laboratório de automação da manufatura), Pneumática, MOP (Laboratório de Maquinas Operatrizes), Soldagem, GD+ (Grupo de Desenvolvimento de Maquinas Especiais) e Almoxarifado.

Nos laboratórios LAM e MOP foram encontrados os equipamentos para a calibração do robô FANUC, utilizado para o processo de soldagem, e as ferramentas necessárias para produzir o gabarito, com marcações de 16, 14 e 12mm, que define a distância do bocal da tocha ao substrato onde é realizada a solda (Figura 4), também conhecida pela sigla DBCP (Distância Bico de Contato a Peça). No de Pneumática, foram encontradas as válvulas e tubos para as conexões do sistema de resfriamento, em conjunto com o Almoxarifado, que forneceu as ferramentas e acessórios necessários para a montagem dos mesmos.

Figura 4 - Gabarito para medição do DBCP



Fonte: Autoria própria (2022).

Para a realização da soldagem, foi utilizado o robô FANUC modelo M10iA com a controladora R30iA (Figura 5) em conjunto com a fonte de soldagem IMC DIGIPLUS A7 e seus acessórios, como o alimentador de arame automático e unidade de refrigeração. O uso desse robô foi essencial para a alta qualidade obtida nas peças produzidas, devido a sua alta repetibilidade, a qual foi avaliada e comprovada por Teichmann, em sua tese de pós-doutorado sob o título, "Análise de variantes de processos de soldagem visando o revestimento com Inconel 625 de tubos em aço API X46".

Figura 5 - Robô FANUC M10iA e Controladora R30iA



Fonte: Autoria Própria (2022).

A fonte de alimentação IMC Digiplus pode atingir correntes de até 800A e permite o controle dos parâmetros de soldagem, pois é uma fonte transistorizada possuindo chaveamento no secundário do seu transformador. Ela é acionada diretamente pela controladora do robô através de saídas digitais e é responsável pelo acionamento do alimentador automático de arame. Uma vez que o sinal de saída seja alto, a fonte energiza o arame e ativa o alimentador. O conjunto da fonte e seus acessórios pode ser observado na Figura 6.

Figura 6 - Refrigeração, alimentador e fonte respectivamente



Fonte: Autoria Própria (2022).

Durante a soldagem é necessário o uso do gás de proteção que é responsável por garantir uma atmosfera adequada para a formação do cordão de

solda. Esse gás é conectado também a fonte de soldagem, que possui uma válvula de retenção que permite a passagem do gás enquanto o arco elétrico estiver aberto e obstrui seu fluxo quando o mesmo se extingue. O gás de proteção utilizado para o desenvolvimento deste projeto foi o Argônio puro (Figura 7), comumente recomendado para soldagem de arames de alumínio. Para o projeto em questão, está sendo utilizada a liga de alumínio 4043a produzida pela empresa ESAB.

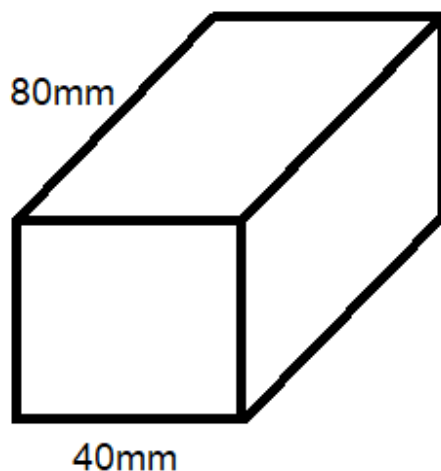
Figura 7 - Botijão de Argônio comprimido



Fonte: Porto Soldas (2022).

Para a realização dos testes foi escolhida a forma geométrica de um prisma quadrangular devido a facilidade de criação do programa de soldagem e por ser uma geometria fechada. Isso fez com que, quando manufaturada, resulta em uma casca com as mesmas dimensões (Figura 8). Esta foi produzida sobre um substrato de alumínio com espessura de 12mm.

Figura 8 - Geometria escolhida para manufatura



Fonte: Autoria Própria (2022).

Após a conclusão, será feita a aquisição de dados de temperatura e capturadas imagens térmicas da peça, permitindo a visualização das regiões de calor durante e imediatamente após sua produção. Para isso será utilizada a câmera térmica VT04A (Figura 9) da marca FLUKE fornecida pelo professor Luciano Amaury.

Figura 9 - Montagem vistas da camera térmica VT04A



Fonte: Autoria Própria (2022).

4 DESENVOLVIMENTO

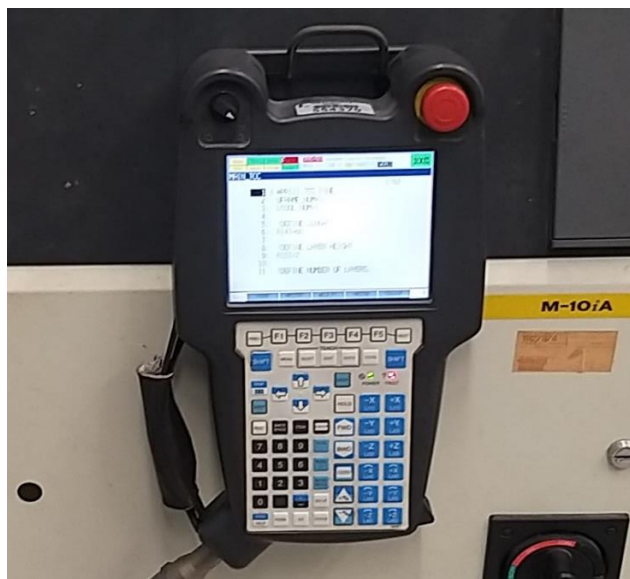
Este trabalho visa comparar o mesmo método de resfriamento forçado, no entanto, variando o fluido refrigerante, com o método de resfriamento passivo. Nesta parte serão abordadas as etapas que levaram a execução do projeto, bem como dificuldades encontradas e suas soluções. Por fim serão exibidos e comparados os resultados obtidos e constatado o fluido mais eficaz para o resfriamento do processo de soldagem em questão.

4.1 Reparo e adequação do maquinário

Antes da realização do projeto foi necessário adequar os equipamentos que, em alguns casos, não se encontravam em funcionamento, como o sistema de refrigeração, o braço robótico e a controladora do robô.

4.1.1 Controladora R30iA e FANUC M10iA

Primeiramente constatou-se que o sistema operacional da controladora R30iA do robô estava comprometido, o que impossibilitava de ligá-la e por consequência operar o robô FANUC. Para isso foi necessário utilizar uma imagem de backup do sistema operacional e forçar a instalação do mesmo, permitindo assim acessar a interface que realiza a movimentação do braço robótico usando o TP (Teach Pedant) (Figura 10). O processo de restauração do sistema foi realizado pelo professor orientador Erwin Werner Teichmann com o auxílio do engenheiro de serviços da FANUC, Rulio Siefert Sera.

Figura 10 - Teach Pedant

Fonte: Autoria própria (2022).

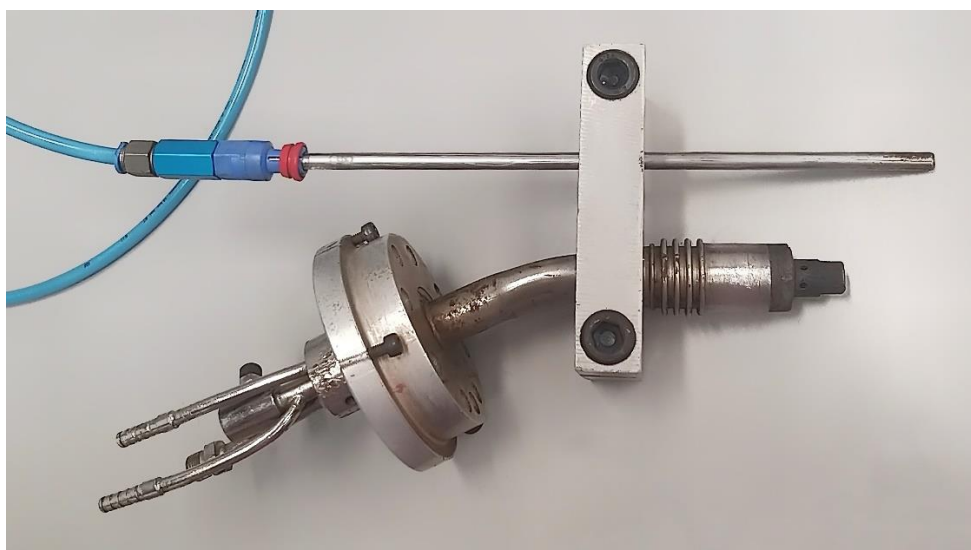
Com o sistema recuperado e restaurado ao seu padrão de fábrica, todos os dados antes armazenados na memória da controladora foram apagados, acarretando na desconfiguração completa do equipamento. Por esse motivo, foi necessário remasterizar o robô usando o método de Zero Position para que o mesmo pudesse se localizar no espaço. Esse procedimento, realizado com o auxílio do professor coorientador Nelso Bonacorso, consiste em alinhar todas as juntas em seus respectivos “zeros” que se encontram marcados em carenagem do robô, como é possível ver na Figura 11.

Figura 11 - Exemplo de marcação na carenagem do robô.

Fonte: Autoria Própria (2022)

Antes de iniciar o procedimento de soldagem, é preciso que as ferramentas estejam fixadas no robô e tenham seu TCP (Tool Center Point) calibrado. O TCP determina exatamente onde é e onde está localizada no espaço a região de trabalho da ferramenta, no caso duas, a tocha e o tubo para o resfriamento da peça. Enquanto uma é, respectivamente, responsável por guiar o arame de soldagem a outra direciona o fluido refrigerante durante o resfriamento forçado. Para a tocha de soldagem, o TCP foi definido exatamente na ponta do eletrodo, aproximadamente 16mm a partir do bocal, enquanto, o tubo de resfriamento, teve o seu TCP calibrado cerca de 30mm a partir da sua extremidade, para evitar colisões durante a manufatura das peças. Para a fixação da saída de ar na tocha, foi usado um adaptador de alumínio fabricado manualmente (Figura 12).

Figura 12 - Tocha e tubo de resfriamento com adaptador de alumínio



Fonte: Autoria própria (2022).

Com o TCP de todas as ferramentas calibrado, resta criar a trajetória que o robô deve percorrer para realizar a soldagem. Essa trajetória, é definida por pontos que são marcados utilizando o gabarito para o DBCP, citado anteriormente, garantindo assim que a distância entre o bico de contato e a peça seja sempre a mesma, no caso 16mm. No entanto, como o robô ainda não estava totalmente adequado para soldar, foi dada a continuidade na manutenção do mesmo.

Após todas as calibrações concluídas, foi possível testar as saídas digitais do robô para verificar o funcionamento da fonte de soldagem e seus acessórios. Durante o acionamento do sistema de refrigeração, foi possível perceber que haviam

diversas rachaduras na mangueira do cabo de força (Figura 13), por onde passa o fluido refrigerante, sendo preciso realizar troca do cabo de força por completo.

Figura 13 – Cabo de força com rachaduras



Fonte: Autoria Própria (2022)

Pelo fato de o material soldado ser alumínio, também foi trocado o tubo guia do arame por um equivalente de teflon, indicado para esse tipo de material. Para realizar esses consertos a tocha foi desmontada, perdendo seu TCP já calibrado, por tanto uma nova calibração foi feita. O resultado final pode ser observado na Figura 14. Esses serviços de manutenção foram realizados com o auxílio do Prof. Erwin e do Sr. Lohan Licht Canhola, técnico da empresa Vandersoldas Ltda.

Figura 14 - Cabos reparados e organizados



Fonte: Autoria própria (2022).

4.1.2 Alimentador automático de arame

O alimentador é responsável por fornecer, continuamente, o arame a extremidade da tocha, permitindo que a solda ocorra. Este é acionado automaticamente pela fonte de soldagem quando a solda está ocorrendo. Para a adequação do alimentador foram trocados os roletes para corresponder ao diâmetro do arame de alumínio de 1.2 mm. Foram usados roletes com canal em U como é recomendado para esse tipo de material (Figura 15).

Figura 15 - Exemplo de rolete com cavidade em U de 1.2mm

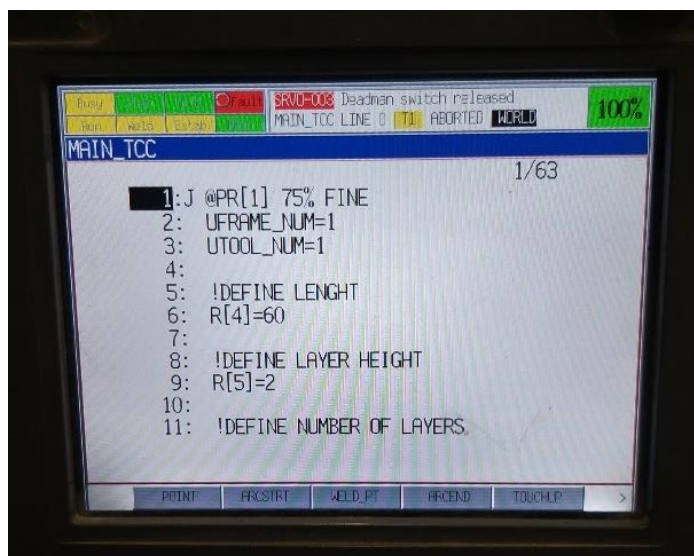


Fonte: kickinghorsewelders.ca (2022).

4.2 Criando programa

Para que seja possível soldar é necessário programar a trajetória que irá gerar o cordão de solda. Em um primeiro momento, foram feitas simulações, porém com a fonte de soldagem desligada, apenas para verificar se o programa estava sendo executado corretamente. Todo o código foi desenvolvido utilizando o TP disponível na controladora do robô (Figura 16).

Figura 16 - Exemplo de programa no TP



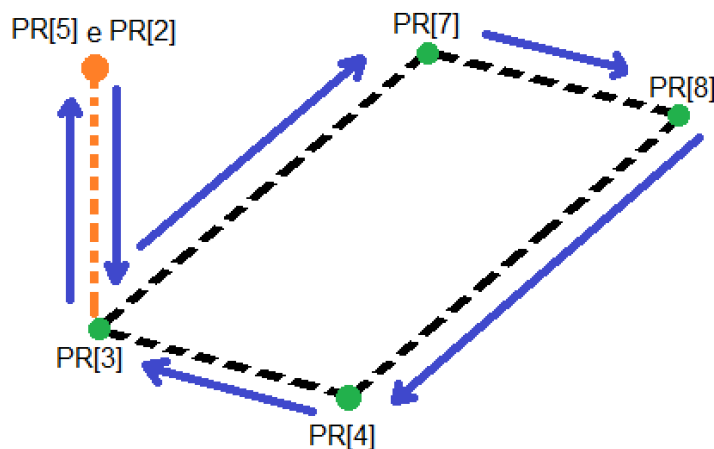
Fonte: Autoria própria (2022).

4.2.1 Logica do programa

Antes de rodar o programa é necessário definir alguns pontos nos registradores de posição (PR) do robô. O usuário deve posicionar a tocha no ponto inicial e salvar no registrador PR[3]. O mesmo deve ser feito para o ponto final, no entanto salvando no registrador PR[4]. Agora com o programa aberto no TP é preciso fornecer o offset em Z para cada camada subsequente, bem como a quantidade de camadas e a velocidade de soldagem em centímetros por minuto. Para o programa que gera formas geométricas de 4 lados, deve-se inserir manualmente apenas o ponto inicial, representado pelo registrador PR[3]. Os pontos de aproximação e afastamento, PR[2] e PR[5], respectivamente, bem como os demais vértices da trajetória, são calculados de forma automática pelo programa.

Na Figura 17 temos a exemplificação da trajetória gerada pelo programa. Os traços pontilhados representam a trajetória e as setas o sentido em que o programa é executado. Os pontos em laranja são respectivos as posições de aproximação e afastamento, enquanto os verdes representam os vértices da figura geométrica.

Figura 17 - Demonstração da trajetória gerada pelo programa



Fonte: Autoria própria (2022).

Foi escolhido o uso de registradores pois, diferentemente dos pontos criados dentro do programa, são globais e independentes de ferramenta, ou seja, ao executar o comando de troca de ferramenta o registrador se adequa automaticamente a ela, sem a necessidade de reprogramá-lo. Isso gera uma maior flexibilidade para a criação de geometrias bem como programas mais robustos, reduzindo a margem para erros e acidentes. Por isso, cada trajetória, pôde ser percorrida duas vezes, uma vez soldando e outra resfriando, sem a necessidade de intervenção humana.

4.2.1.1 Programa com base em dois pontos

Antes de apresentar o resultado, é necessário esclarecer a lógica do programa em questão. Abstraindo os pontos de aproximação e afastamento, na Figura 18, é possível entender de maneira mais clara a trajetória que o robô realiza. As camadas pares possuem sentido contrário das camadas impares, ou seja, iniciam e terminam em lados opostos. Ainda na Figura 18, a trajetória das camadas está representada por linhas pontilhadas e com uma seta no centro, que indica o sentido que foi percorrido pelo robô. Os pontos verdes e vermelhos indicaram o início e o fim da trajetória, respectivamente.

Figura 18 - Demonstração da lógica do programa de dois pontos



Fonte: Autoria própria (2022)

Primeiramente, com os registradores já configurados o robô seleciona a tocha como ferramenta ativa e se deslocar para a posição de descanso. Em seguida avança para o ponto de aproximação e reduz sua velocidade ao dirigir-se para o ponto de início do cordão. Nesse momento a fonte de alimentação é acionada e deixa o robô em espera enquanto libera o pré-gas. Depois disso o arco é estabelecido e o processo de soldagem se inicia até alcançar o ponto final onde a fonte é desabilitada e o arco elétrico extinguido. Com a finalização, o robô retorna ao ponto inicial da soldagem, no entanto, agora com o tubo de ar para resfriar a mesma trajetória feita anteriormente. Por fim o robô retorna à posição de descanso, resultando em um cordão de solda em linha reta, que quando empilhado gera uma parede, como é observado na Figura 19.

Figura 19 - Testes do programa de dois pontos

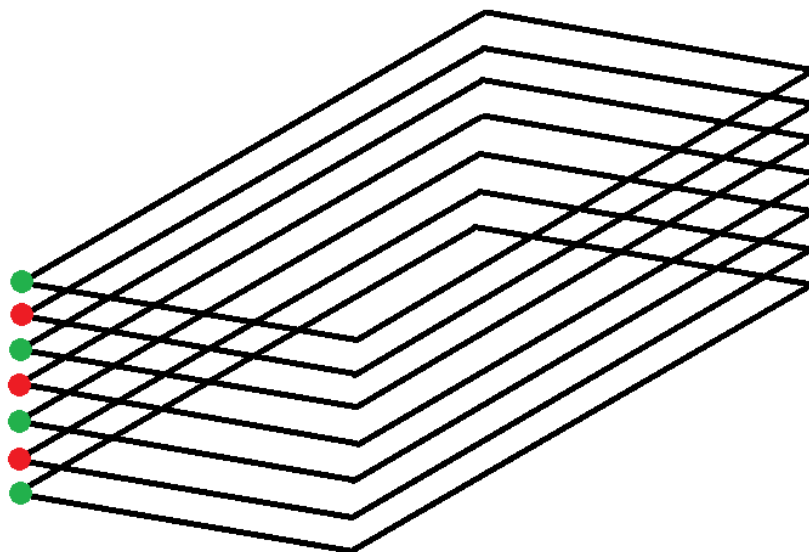


Fonte: Autoria própria (2022).

4.2.1.2 Programa com base em 1 ponto

De maneira análoga ao programa de dois pontos, a trajetória das camadas pares, possui sentido oposto as das ímpares, no entanto, como a figura geométrica escolhida, um prisma, é fechada, o ponto inicial e final coincidem. Na Figura 20, quando o ponto inicial possui cor verde, indica que a trajetória naquela camada segue no sentido horário, enquanto a cor vermelha significa sentido anti-horário. Os pontos de aproximação e afastamento e vértices foram abstraídos para facilitar o entendimento da figura.

Figura 20 - Demonstração da lógica do programa de quatro pontos



Fonte: Autoria própria (2022).

Também, com todos os pontos já pré-configurados, ao executar o programa o robô realiza a trajetória seguindo os pontos armazenados nos registradores, realizando a mesma lógica de aproximação, abertura/fechamento do arco e afastamento vista no método de 2 pontos, bem como os mesmos parâmetros de velocidade, offset em Z e número de camadas. Ao finalizar uma camada o robô retorna ao ponto inicial e realiza o resfriamento passando pela mesma trajetória de solda, agora com o tubo de ar. Na Figura 21 podemos observar o resultado sendo a casca de um prisma quadrangular.

Figura 21 - Teste programa de 4 pontos

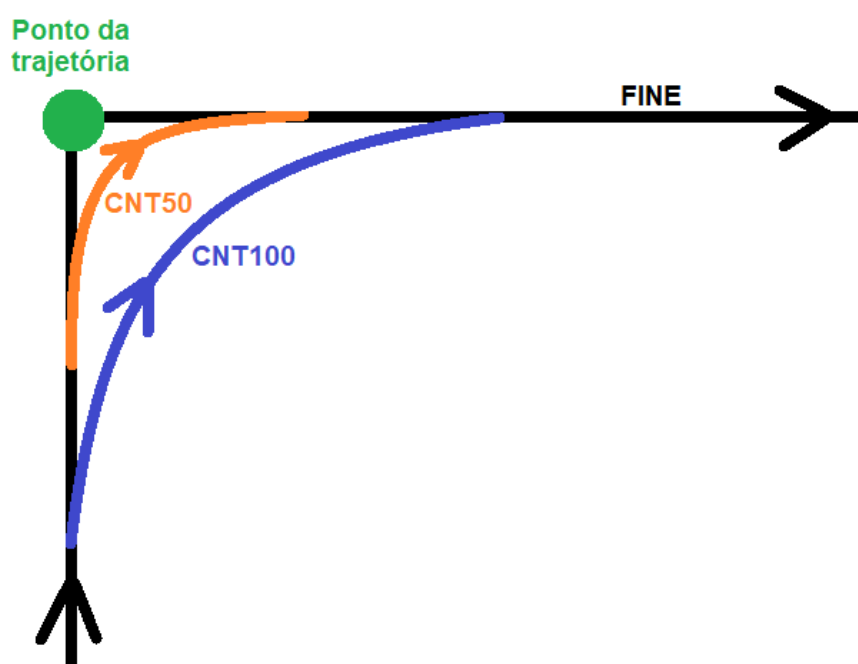


Fonte: Autoria própria (2022).

Na figura anterior é possível notar que houve acúmulo de material nas extremidades da geometria produzida e também uma deformação no ponto inicial e final de soldagem. Para a correção destes erros foram feitas alterações no código principal para que o robô não parasse completamente em cada canto da peça.

Primeiramente, para corrigir o excesso de material nos cantos da peça, o tipo de movimento, FINE, que para completamente no ponto, foi alterado para CNT100. O número que acompanha essa configuração pode ser interpretado de forma que, o robô chegará o mais próximo possível do ponto mantendo, no caso, 100% da velocidade programada. No entanto, para isso, a trajetória que antes era um canto perpendicular, passa a ser arredondada, possuindo agora, um raio. Quanto mais próximo de 100, maior costuma ser o raio calculado pelo robô. Na Figura 22 é possível ver uma representação mais clara das diferenças na trajetória, representada por linhas, entre essas duas configurações.

Figura 22 - Diferença entre FINE e CNT



Fonte: Autoria própria (2022).

Para amenizar as deformações no ponto inicial e final da soldagem, foram adicionados 2 pontos auxiliares a 15mm de distância, respectivamente, do ponto inicial e final do cordão de solda, tornando possível utilizar velocidade deferentes nestes pontos. Ao combinar essas duas correções, os problemas de acúmulo de

material nos vértices da peça, bem como as deformações em seu início e fim, foram resolvidos (Figura 23).

Figura 23 - Correção dos problemas no programa de 4 pontos



Fonte: Autoria Própria (2022).

4.3 Sobreposição de camadas

Ao realizar um cordão de solda é possível perceber um acúmulo excessivo de material no ponto inicial da trajetória e a falta no ponto final, algo que se torna notável quando ocorre o acúmulo de múltiplos cordões. Isso faz com que a peça formada fique extremamente irregular e apresente deformidades nos pontos iniciais e finais, como pode ser visto na Figura 24.

Figura 24 – Exemplo de parede irregular



Fonte: Autoria própria (2022).

Para contornar esse problema os programas foram alterados de forma que a camada subsequente inicie no lado oposto do anterior, ou seja, ocorre um balanceamento natural que reduz a diferença de altura entre esses dois pontos na peça produzida (Figura 25).

Figura 25 - Exemplo de paredes regulares



Fonte: Autoria própria (2022).

4.4 Aplicação dos métodos de resfriamento

Para todos os processos de resfriamento utilizados neste trabalho, o programa utilizado para o processo de soldagem foi o mesmo, variando apenas os fluídos refrigerantes. Como o objetivo é avaliar o resfriamento da peça, a utilização do mesmo programa garante que o tempo de solda e resfriamento sejam idênticos nos três métodos escolhidos, reduzindo assim qualquer variação inesperada no resultado final.

Para alternar entre os tipos de resfriamento, as únicas mudanças necessárias foram alternar as mangueiras entre ar comprimido e CO₂ comprimido, de acordo com o processo sendo usado no momento. No caso do passivo, foram desconectadas as mangueiras de entrada de ar, pois assim se garante que o tempo de resfriamento passivo seja exatamente o mesmo do forçado.

A diante serão abordados os resultados obtidos em cada um dos processos e comentados pontos que influenciaram para tais resultados.

5 CONSIDERAÇÕES FINAIS

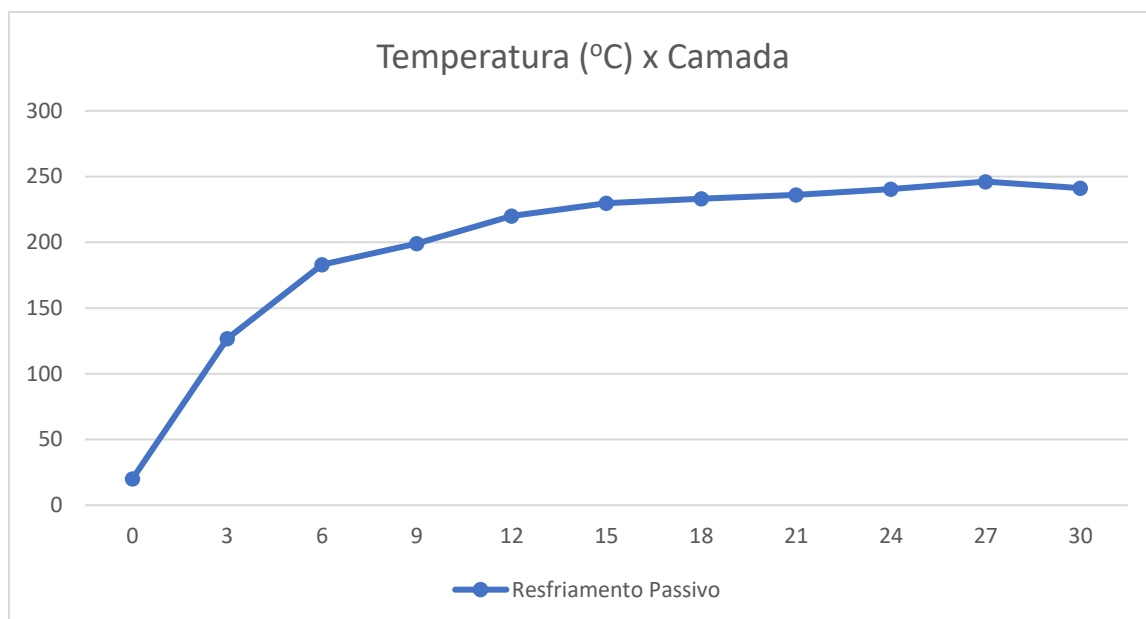
Após a execução de todos os três processos de resfriamento, foi realizado o levantamento de dados e análise dos resultados obtidos em cada um deles. Vale ressaltar que todos os parâmetros foram mantidos idênticos entre os três métodos, bem como o tempo de produção, resfriamento e altura de camadas.

5.1 Resultados obtidos

Durante a produção das peças, a cada camada, foram adquiridas imagens térmicas para a elaboração de gráficos de temperatura em relação a quantidade de camadas já depositadas. Também foram medidas as temperaturas na parte inferior no substrato, a um intervalo fixo de 3 camadas. A seguir serão mostrados os resultados obtidos em cada método de resfriamento e então comparados seus resultados.

5.1.1 Resfriamento passivo

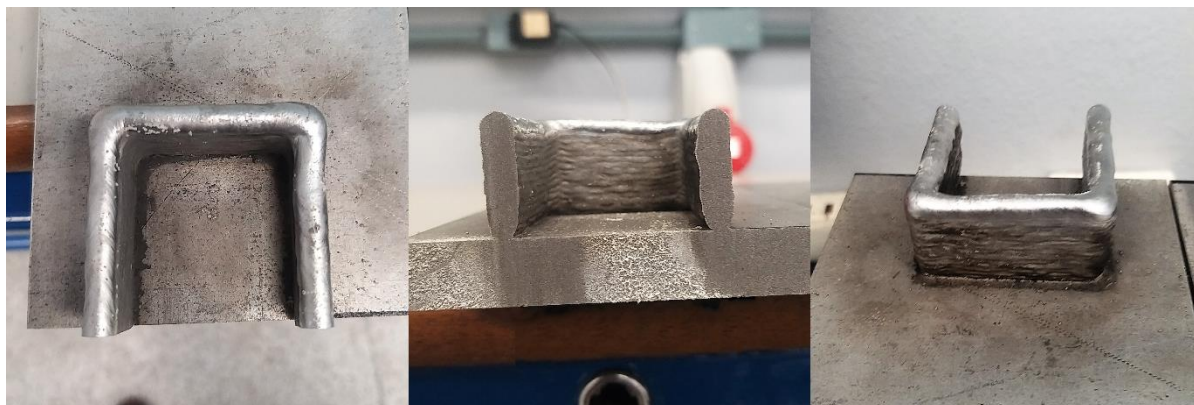
Quando observamos a temperatura imediatamente após a conclusão da peça, percebe-se o substrato chegou próximo aos 250°C. Ao analisarmos todas medições realizadas durante o processo, notamos um crescimento exponencial da temperatura no decorrer das camadas. É interessante salientar que após uma determinada quantidade de camadas depositadas, a temperatura da peça se estabiliza na região de 240°C. A Figura 26 contém um gráfico que exhibe essas informações de maneira mais detalhada.

Figura 26 - Resfriamento Passivo

Fonte: Autoria própria (2022).

Como resultado final desta técnica, percebe-se um aspecto visual agradável indo de encontro com o que se esperava, pois inicialmente foi constatado que, devido ao acúmulo excessivo de tempera não seria possível concluir a produção da peça utilizando o resfriamento passivo.

Na Figura 27 podemos ver o resultado obtido, acompanhado do corte da seção transversal que mostra o interior dos cordões de solda que, por sua vez, não apresentam falhas que comprometam a qualidade e usabilidade da peça produzida.

Figura 27 - Resultado obtido no resfriamento passivo

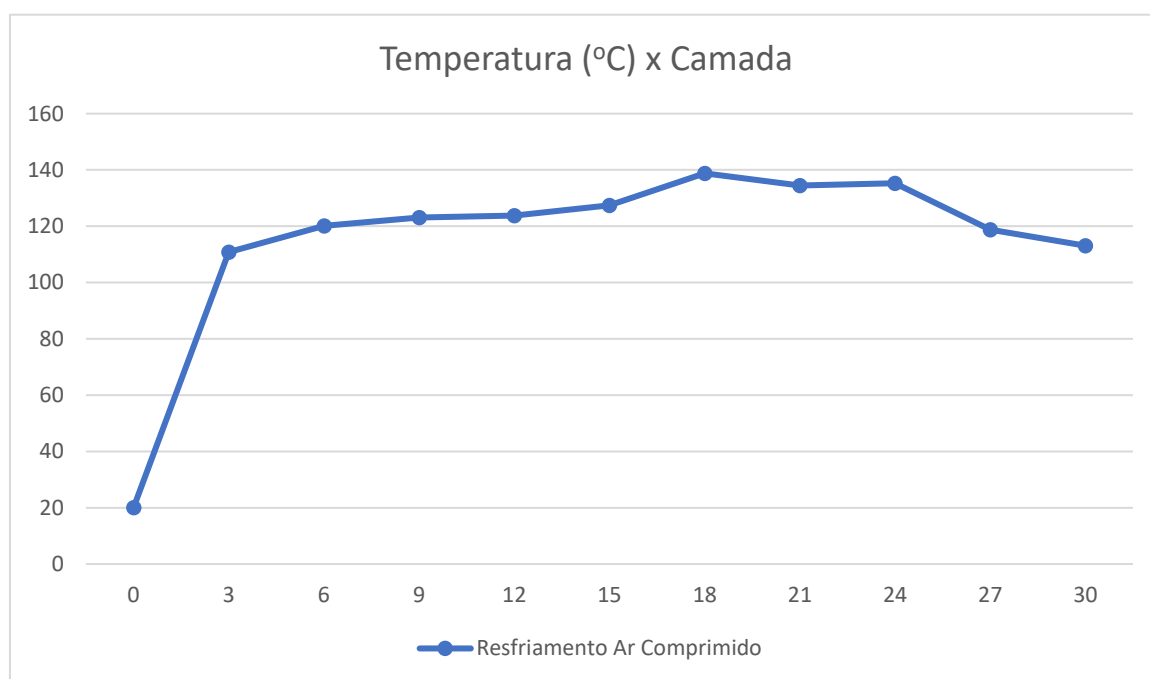
Fonte: Autoria própria (2022).

Ao realizar as medições de espessura e altura dos cordões de solda, foi constatado um valor médio para a altura de 23.38mm, ou seja, aproximadamente 0.78mm/camada e uma espessura média de aproximadamente 6.63mm.

5.1.2 Resfriamento forçado com ar comprimido

Agora no resfriamento forçado usando ar comprimido, ao observar a temperatura imediatamente após a conclusão da peça, é possível averiguar que o substrato estava a cerca de 113°C. Ao analisarmos todas medições realizadas durante o processo, diferentemente do procedimento anterior, nota-se um breve aumento de temperatura nas primeiras camadas e uma estabilização na região de 130°C no decorrer da produção. A Figura 28 apresenta essas informações de forma mais detalhada.

Figura 28 - Resfriamento forçado com ar comprimido

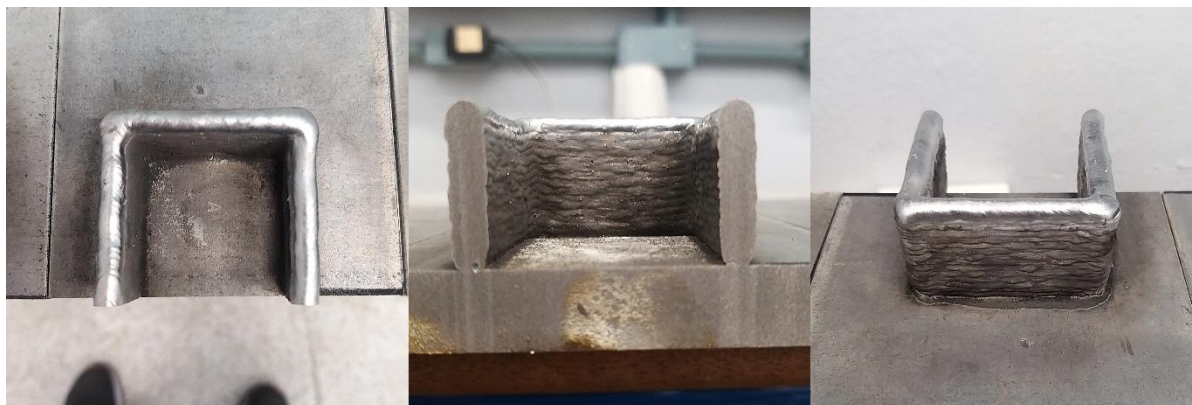


Fonte: Autoria própria (2022).

Como era de se esperar, a o resultado obtido da produção da peça (Figura 29) possui camadas mais finas, porém mais altas, o que é comprovado ao realizar medições e calcular uma altura média de 25.2mm, ou seja, 0.84mm/camada. Já a espessura média das 4 paredes foi de 6.27mm. Ao realizar o corte da seção

transversal (Figura 29) podemos ver que o interior dos cordões de solda não apresenta falhas, garantindo a qualidade e usabilidade da peça produzida.

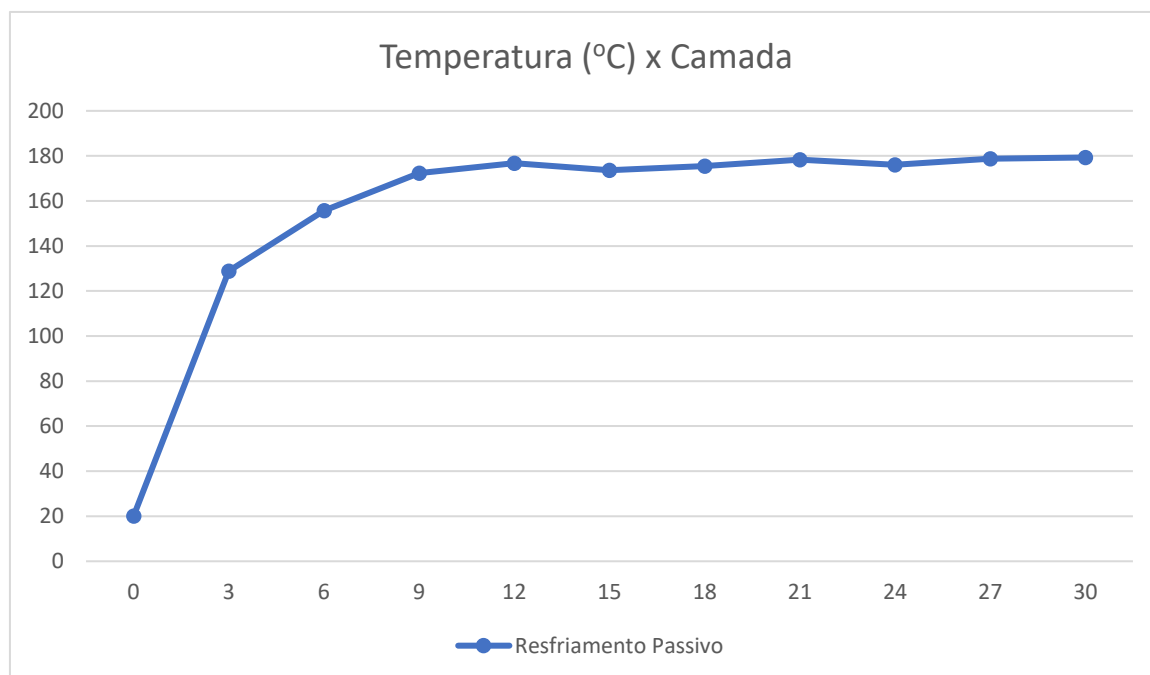
Figura 29 - Resultado obtido no resfriamento a ar comprimido



Fonte: Autoria Própria (2022).

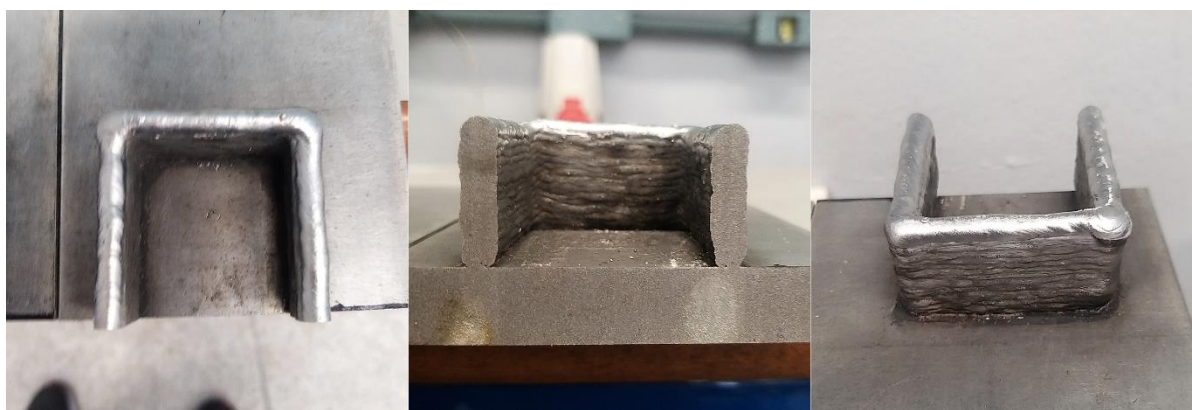
5.1.3 Resfriamento forçado com CO₂

Com o método em questão foram obtidas temperaturas mais altas do que o esperado devido aos problemas com a válvula, no entanto, ainda sim foi possível alcançar cerca de 179°C imediatamente após a conclusão da peça. De maneira similar aos outros processos, houve a estabilização da temperatura do substrato, agora na faixa de 177°C como é possível observar na Figura 30.

Figura 30 - Resfriamento forçado com CO₂

Fonte: Autoria própria (2022).

Os resultados obtidos foram de uma altura média de 23.36mm, entorno de 0.78mm/camada, similar ao do resfriamento passivo, e uma espessura média de aproximadamente 6.44mm. Pela inspeção visual a peça foi considerada de boa qualidade, valendo também para a análise do interior dos cordões depositados (Figura 31).

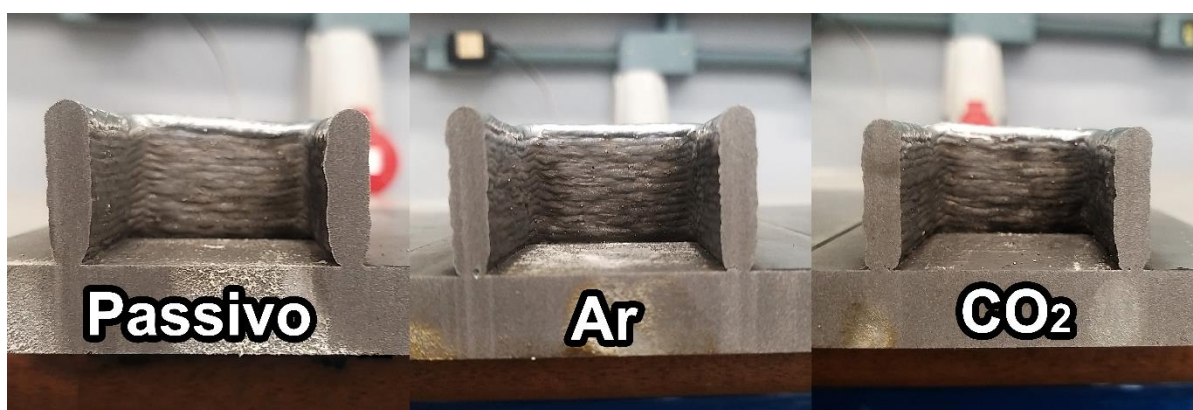
Figura 31 - Resultado obtido no resfriamento a CO₂ comprimido

Fonte: Autoria própria (2022).

5.2 Conclusão

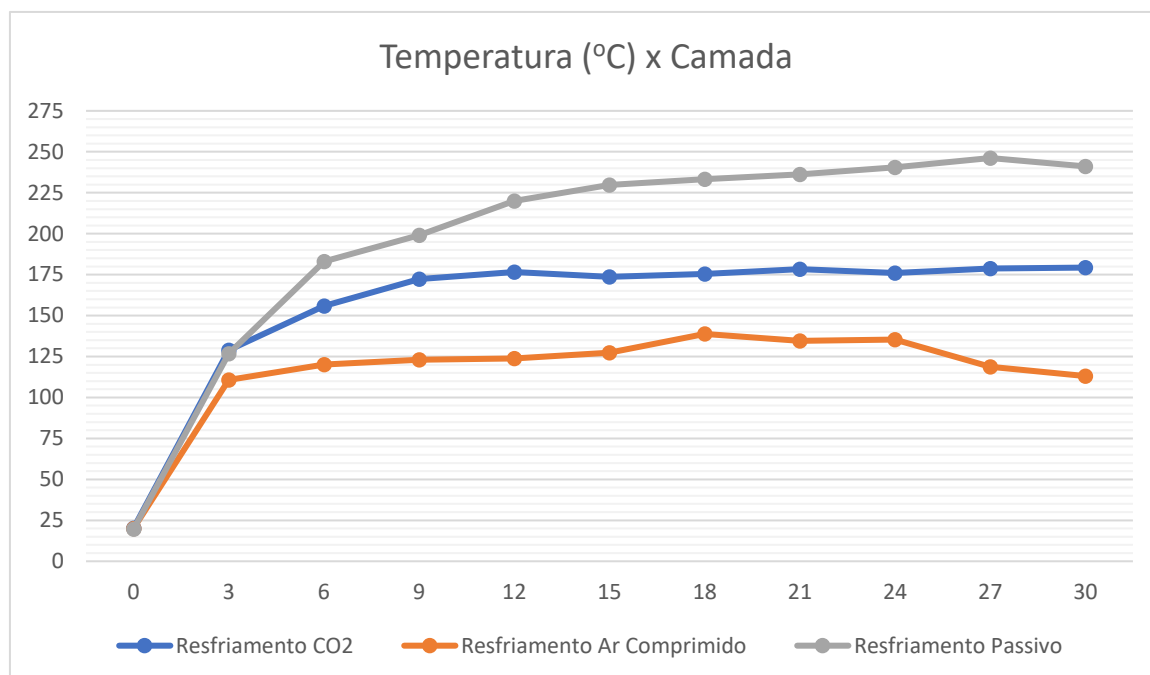
O resultado para ambas as três peças foi visualmente idêntico, como é possível ver na Figura 32. Com as imagens lado a lado fica clara a diferenças de espessuras apresentadas anteriormente. No entanto, apesar de visualmente semelhantes, foi constatado que, os cordões de solda produzidos pelo método de resfriamento forçado a ar comprimido, ficaram mais finos e muito mais regulares que o restante dos métodos.

Figura 32 - Comparação dos resultados entre os métodos



Fonte: Autoria própria (2022).

Ao comparar as temperaturas que o substrato foi submetido no decorrer da produção é possível perceber uma diferença notável entre os métodos (Figura 33).

Figura 33 - Comparação de temperatura entre os métodos

Fonte: Autoria Própria (2022).

5.3 Tempo de resfriamento e tempo de produção

Para cada camada produzida, na geometria em questão, teve um tempo de aproximadamente 58 segundos. No entanto, desse total, 12 segundos, foram adicionados para que o sistema ficasse pausado, permitindo assim a aquisição das imagens térmicas e medições de temperatura. Com isso, pode-se concluir que o tempo real para a produção de uma única camada é cerca de 46 segundos. O processo de resfriamento, mais lento, consome dois terços do tempo total de produção de uma camada, 30.6 segundos, enquanto o processo de soldagem, ou seja, enquanto o arco está aberto, utiliza o restante, equivalente um terço do tempo total, 15.3 segundos.

Após a análise gráfica das temperaturas no decorrer das camadas, foi possível notar uma eficiência superior no processo de resfriamento a ar comprimido. Para esse método, seria possível aumentar a velocidade do resfriamento e refiná-la para obter a melhor eficiência possível e aumentar a produtividade.

5.4 Vazão de gás

Ao observar o gráfico que compara as temperaturas, Figura 33, percebe-se que o resultado obtido não foi exatamente como esperado, onde o resfriamento com CO₂ deveria ser o mais efetivo. Devido ao problema causado pela válvula de duplo estágio, utilizada para o CO₂, todo o calor que é absorvido pelo gás em sua descompressão ficou retido na válvula (Figura 34). Isso fez com que ele saísse em temperatura ambiente reduzindo a sua eficiência.

Também, devido ao controle de fluxo contido na válvula, a vazão do gás CO₂ não ultrapassou os 27l/min, enquanto o ar comprimido não teve seu fluxo regulado, saindo com o máximo possível.

Figura 34 - Formação de gelo na valvula de duplo estágio



Fonte: Autoria Própria (2022).

5.5 Parâmetros de soldagem

Para a realização do cordão de solda, este trabalho visava utilizar uma velocidade de soldagem de 120mm/min, no entanto, no decorrer dos testes houve a necessidade de reduzi-la para 105mm/min, devido a inconsistências no mantimento do arco aberto e problemas com a atmosfera composta pelo gás de proteção. A fonte de soldagem desempenhou muito bem no modo adaptativo, o que, de certa forma, facilitou sua configuração. Os parâmetros utilizados podem ser vistos na Figura 35.

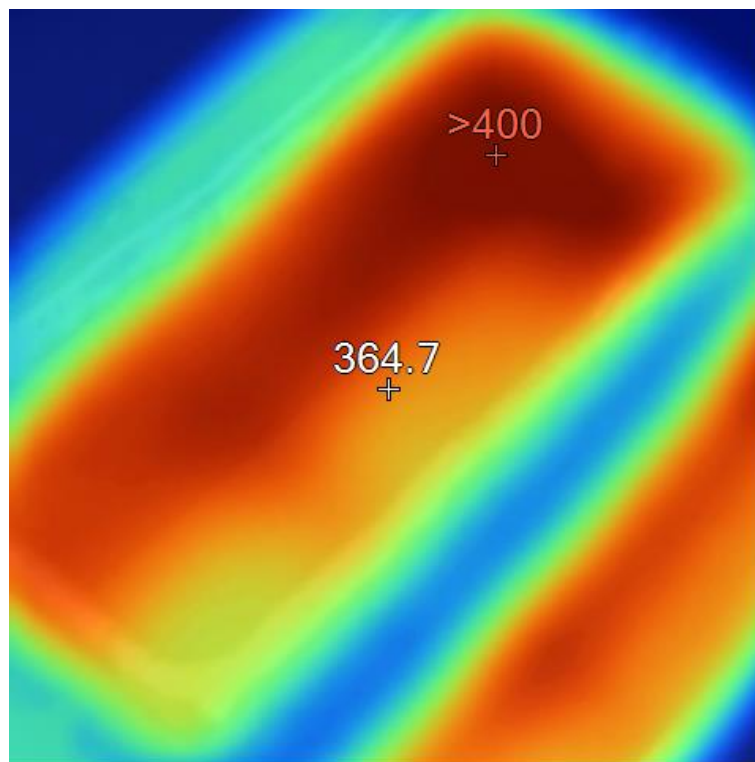
Figura 35 - Parâmetros usados na fonte de soldagem



Fonte: Autoria própria (2022).

5.6 Temperatura entre os passes de soldagem

Para a medição térmica da peça foram utilizados sensores infravermelhos que calculam a temperatura com base na radiação emitida por um corpo. No entanto, a medição é influenciada por uma propriedade conhecida por emissividade. Para a maioria dos objetos cotidianos, a emissividade varia entre 0,95 e 0,98. Já a do alumínio varia entre 0,05 e 0,6 conforme o grau de oxidação. Dado esse fator, não é possível definir correlatamente a temperatura utilizando a câmera térmica, pois diversas manchas, com a coloração térmica incorreta, surgiram. Na Figura 36, quanto mais próximo da cor rubra, indica temperatura acima de 400°C, enquanto a coloração azul escura indica temperatura ambiente, de 20.1°C.

Figura 36 - Imagem térmica

Fonte: Autoria própria (2022).

Já que a medição diretamente no alumínio se torna imprecisa, devido ao fator citado anteriormente, o verso do substrato do foi pintado para possibilitar a medição (Figura 37). Por isso, para obter temperaturas ainda mais precisas, uma solução é medir utilizando termopares ou outro tipo de sensor que não dependa da emissividade para uma leitura adequada.

Figura 37 – Substrato com o verso pintado



Fonte: Autoria própria (2022).

5.7 Geometria das peças manufaturadas

A geometria escolhida é, de certa forma, simples, onde o resultado é a casca de um quadrilátero retangular. Justamente por ser apenas uma casca, pouco calor é gerado durante o processo de soldagem, quando comparado com a produção da mesma geometria, porém sólida. Isso faz com que a massa térmica da peça se eleve, retendo ainda mais calor. Por esse motivo, se espera que, o método de ar comprimido, seja ainda mais eficiente e relevante na produção de peças complexas que possuam algum tipo de preenchimento.

5.8 Sugestões de melhoria para trabalhos futuros

Após a elaboração do projeto foram analisados alguns pontos que, se aplicados em trabalhos futuros, podem contribuir para o aumento de eficiência dos

métodos de resfriamento forçado, e corrigir outros problemas encontrados. Esses pontos são:

- Utilização de uma válvula que não retenha o calor nela;
- Considerar o uso de uma válvula que permita um fluxo maior de vazão de gás.
- Uso de termopares para aquisição dos dados térmicos com mais precisão.
- Realizar manufatura de geometrias complexas com preenchimento;
- Variar parâmetros de soldagem;
- Equalizar vazões entre o ar comprimido e CO₂ comprimido

REFERÊNCIAS

ALBERTI, E. A. et al. **Manufatura Aditiva**: o papel da soldagem nesta janela de oportunidade, São Paulo: Scielo, jul. 2014. DOI: 10.1590/0104-9224/SI1902.11. Disponível em: <https://www.scielo.br/j/si/a/s3NZQpdTmJWcr37MNNBtMnS>. Acesso em: 07 jun. 2022.

Cilindro Argônio 3m³. PORTO SOLDAS.2022. Disponível em: <https://portosoldas.com.br/products/cilindro-argonio-3m>. Acesso em 17 jun. 2022.

DING, D. et al. A multi-bead overlapping model for robotic wire and arc additive manufacturing (WAAM). **Robotics And Computer-integrated Manufacturing**, v. 31, p.101-110, fev. 2015. DOI: <http://dx.doi.org/10.1016/j.rcim.2014.08.008>. Disponível em: <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S0736584514000696?via%3Di> [hub](#). Acesso em: 01 jun. 2022.

DING, D. et al. A practical path planning methodology for wire and arc additive manufacturing of thin-walled structures. **Robotics And Computer-integrated Manufacturing**, v. 34, p.8-19, ago. 2015. DOI: <http://dx.doi.org/10.1016/j.rcim.2015.01.003>. Disponível em: <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S0736584515000162?via%3Di> [hub](#). Acesso em: 03 jun. 2022.

DING, D. et al. Wire-feed additive manufacturing of metal components: technologies, developments and future interests. **The International Journal Of Advanced Manufacturing Technology**. p.465-481, nov. 2015. DOI: <http://dx.doi.org/10.1007/s00170-015-7077-3>. Disponível em: <https://link.springer.com/article/10.1007/s00170-015-7077-3>. Acesso em: 01 jun. 2022.

ESAB. Apostila de soldagem MIG/MAG. 2005.

IMC, Manual de Instruções DIGIPLUS A7. 8.ed, 2015.

FANUC, Manual de manuseio braço robótico M10iA.

MARQUES, P.V.; MODENESE, P.J.; BRACARENSE, A.Q. **Soldagem**: fundamentos e tecnologia. 3. ed. Belo Horizonte: UFMG, 2009. Disponível em: <https://books.google.com.br/books?id=ulxCk9lcgJEC>. Acesso em 28 maio 2022.

NERISM, M.M. **Apostila de soldagem**. Santa Cecília: UNISANTA, [2015?]. Disponível em: <https://cursos.unisanta.br/mecanica/solda.html>. Acesso em 29 maio 2022

SILVA, L. J. et al. Concept and validation of an active cooling technique to mitigate heat accumulation in WAAM. **The International Journal of Advanced Manufacturing Technology**, mar. 2020. DOI: 10.1007/s00170-020-05201-4. Disponível em: https://www.researchgate.net/figure/Experimental-rig-representation-for-the-NIAC-concept_fig5_340083207. Acesso em: 05 jun. 2022.

TEICHMANN, E. W. **Análise de variantes de processos de soldagem visando o revestimento com Inconel 625 de tubos em aço API X46**. UFSC, 2016.

U groove drive roller feeding. KIGNINGHORSE .2022. Disponível em: https://kickinghorsewelders.ca/index.php?main_page=product_info&cPath=134&products_id=444. Acesso em 17 jun. 2022.