

**INSTITUTO FEDERAL DE EDUCAÇÃO, CIÊNCIA E TECNOLOGIA DE SANTA
CATARINA**

**DEPARTAMENTO ACADÊMICO DE METAL-MECÂNICA
BACHARELADO EM ENGENHARIA MECATRÔNICA**

GUILHERME ROBERTO PAMPLONA

**PARAMETRIZAÇÃO E ANÁLISE DA SOLDAGEM MIG/MAG CONVENCIONAL
PARA A MANUFATURA ADITIVA UTILIZANDO REFRIGERAÇÃO FORÇADA**

FLORIANÓPOLIS, DEZEMBRO DE 2018

**INSTITUTO FEDERAL DE EDUCAÇÃO, CIÊNCIA E TECNOLOGIA DE SANTA
CATARINA**

**DEPARTAMENTO ACADÊMICO DE METAL-MECÂNICA
BACHARELADO EM ENGENHARIA MECATRÔNICA**

GUILHERME ROBERTO PAMPLONA

Trabalho de Conclusão do Curso de
Graduação em Engenharia Mecatrônica do
Departamento de Metal Mecânica do Instituto
Federal de Santa Catarina como requisito
para obtenção do Título de Engenheiro
Mecatrônico.

Orientadora: Prof. Dr. Cynthia Beatriz Scheffer
Dutra

FLORIANÓPOLIS, DEZEMBRO DE 2018

Ficha de identificação da obra elaborada pelo autor.

PAMPLONA, GUILHERME ROBERTO
PARAMETRIZAÇÃO E ANÁLISE DA SOLDAGEM MIG/MAG CONVENCIONAL
PARA A MANUFATURA ADITIVA UTILIZANDO REFRIGERAÇÃO FORÇADA
/ GUILHERME ROBERTO PAMPLONA ; orientação de
CYNTHIA BEATRIZ SCHEFFER DUTRA. - Florianópolis,
SC, 2018.

57 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. Soldagem mig/mag. 3. Refrigeração
forçada. I. DUTRA, CYNTHIA BEATRIZ SCHEFFER.
II. Instituto Federal de Santa Catarina. Departamento
Acadêmico de Metal Mecânica. III. Título.



INSTITUTO FEDERAL
SANTA CATARINA

MINISTÉRIO DA EDUCAÇÃO
SECRETARIA DE EDUCAÇÃO PROFISSIONAL E TECNOLÓGICA
INSTITUTO FEDERAL DE EDUCAÇÃO, CIÊNCIA E TECNOLOGIA DE SANTA CATARINA
CAMPUS FLORIANÓPOLIS

DECLARAÇÃO DE FINALIZAÇÃO DE TRABALHO DE CURSO

Declaro que o(a) estudante **GUILHERME ROBERTO PAMPLONA**, matrícula nº 132004241-4, do Curso de Engenharia Mecatrônica, defendeu o trabalho intitulado **PARAMETRIZAÇÃO E ANÁLISE DA SOLDAGEM MIG/MAG CONVENCIONAL PARA A MANUFATURA ADITIVA UTILIZANDO REFRIGERAÇÃO FORÇADA**, o qual está apto a fazer parte do banco de dados da Biblioteca Hercílio Luz do Instituto Federal de Santa Catarina, Campus Florianópolis.

Florianópolis, 12 de dezembro de 2018.

Prof. Orientador do TCC: Cynthia Beatriz Scheffer Dutra

AGRADECIMENTOS

Agradeço aos meus pais, Marcos e Maria Eduarda, e à minha irmã, Maria Beatriz, por todo apoio e incentivo em todas as minhas escolhas, estando sempre ao meu lado em todos os momentos.

Aos meus tios, Iza e Joel, pela acolhida em sua residência e pela convivência do dia a dia, ajudando sempre que foi preciso.

Agradeço à minha namorada, Pâmela, por me incentivar a buscar e atingir meus objetivos.

À minha orientadora, professora Cynthia, pela atenção e conhecimento compartilhado pelos anos de parceria em projetos realizados.

Ao professor Erwin, pela ajuda e orientação no decorrer de atividades realizadas no último semestre.

Ao companheiro de curso e amigo, Max, que não mediu esforços em ajudar com o desenvolvimento do trabalho realizado.

Ao professor André, pela ajuda nas medições realizadas no decorrer do trabalho.

Aos bolsistas e técnicos dos laboratórios, que ajudaram sempre que foi preciso.

Aos amigos que me acompanharam ao longo dessa graduação, em especial Guilherme Bueno Silveira, Igor Pereira, e Nicolas Pacheco, por todos os momentos de alegria e nervosismo que passamos juntos nesses cinco anos.

RESUMO

Um dos gargalos da indústria metal mecânica brasileira se encontra no grande tempo de fabricação e qualidade das peças. A automatização dos processos, mais especificamente da solda, se apresenta como uma das grandes soluções para os problemas citados, atuando nas indústrias automotivas, de construção naval, tubulações, geradores, e demais áreas da mecânica. A manufatura aditiva é capaz de produzir desde peças simples a peças complexas. Existem diversos processos utilizados na manufatura aditiva, como a sinterização a laser, o plasma e o GMAW (Gas Metal Active Welding), conhecido também como MIG/MAG. Devido à grande transferência de calor envolvida no processo de MIG/MAG, quando comparado ao laser, o processo apresenta algumas dificuldades na área da manufatura aditiva, porém, apresenta um custo de investimento inicial menor que o outro processo citado. Visando o desenvolvimento da tecnologia nacional e a sua evolução esse trabalho aludi a parametrização e análise do processo MIG/MAG convencional robotizado para a manufatura aditiva utilizando refrigeração forçada. O projeto foi realizado no Laboratório de Soldagem do IFSC (Instituto Federal de Santa Catarina), utilizando os recursos já disponibilizados no local, como o robô FANUC para os testes e análises, a fonte de soldagem IMC Digiplus A7, sendo feitas análises da corrente utilizada na formação dos cordões, aquisições de temperatura com diferentes tempos de parada comparando-se a mesma quando há, ou não, refrigeração forçada com ar comprimido e medições da altura das construções realizadas pela manufatura aditiva. Durante o trabalho foi desenvolvido um sistema de refrigeração forçada com ar comprimido para a manufatura aditiva que está em processo de patenteamento.

Palavras-chave: Deposição metálica, ar comprimido, manufatura aditiva.

ABSTRACT

One of the bottlenecks of the Brazilian metalworking industry is the large manufacturing time and quality of the pieces. The automation of processes, more specifically of welding, is presented as one of the great solutions to the problems mentioned, working in the automotive, shipbuilding, piping, generator, and other mechanical areas. Additive manufacturing is capable of producing from simple parts to complex parts. There are several processes used in additive manufacturing, such as laser sintering, plasma and GMAW. Due to the great heat transfer involved in the GMAW process, when compared to the laser, the process presents some difficulties in the additive manufacturing area, however, it presents an initial investment cost lower than the other process mentioned. Aiming the development of the national technology and its evolution, this work alluded to the parameterization and analysis of the conventional GMAW process for the additive manufacture using forced cooling. The Project was carried out at the Welding Laboratory of the IFSC (Federal Institute of Santa Catatrina), using the resources already available at the site, such as the FANUC robot for testing and analysis, the IMC 800A welding source, being made analyzes of the current used in the cords formation, temperature acquisitions with different stopping times comparing when there is or not forced cooling and height measurements of the constructions performed by the additive manufacturing. During the development of the work a forced cooling system with compressed air was developed for the additive manufacturing that is the process of patenting.

Key words: Metal deposition, compressed air, additive manufacturing.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 - Comparação entre transferências	4
Figura 2 - Sentido de soldagem em uma direção	7
Figura 3 - Parede com diferença de altura	7
Figura 4 - Sentido de soldagem em duas direções	8
Figura 5 - Parede nivelada	8
Figura 6 - TP com programação.....	9
Figura 7 - Fonte de soldagem IMC	10
Figura 8 - Display no modo convencional normal.....	11
Figura 9 - Display fonte no modo convencional sinérgico	11
Figura 10 - Robô FANUC e controlador	12
Figura 11 - Montagem com todos os equipamentos	12
Figura 12 - Fluxograma de programação	13
Figura 13 - Primeira parede confeccionada	16
Figura 14 - Parede formada com parâmetros mais bem ajustados	17
Figura 15 - Gráfico da variação da corrente em função do número de camadas.....	17
Figura 16 – Gráfico da corrente em função das camadas utilizando na fonte os valores da tabela 6	18
Figura 17 - Parede com parâmetros melhor ajustados	19
Figura 18 - Corte transversal.....	20
Figura 19 - Cabo utilizado para a transferência do programa para a fonte	21
Figura 20 - Fluxograma de sentido duplo de soldagem	21
Figura 21 - Parede com programa novo.....	22
Figura 22 - Parede criada no modo sinérgico.....	24
Figura 23 - Termômetro Infravermelho.....	25
Figura 24 - Metodologia para medição da temperatura.....	26
Figura 25 - Gráfico de comparação de temperaturas.....	27
Figura 26 - Gráfico de temperatura para 60s de parada	28
Figura 27 - Gráfico de comparação entre 30 e 60s	29
Figura 28 - Diagrama de Sinais da eletroválvula.....	30
Figura 29 - Eletroválvula acoplada	30
Figura 30 - Gráfico de comparação de temperatura utilizando resfriamento forçado	32
Figura 31 - Gráfico de temperatura com e sem resfriamento	33

Figura 32 - Parede cortada para análise interna	34
Figura 33 - Máquina de medição por coordenadas	34
Figura 34 - Parede sendo medida	35
Figura 35 - Construção com estratégia quadrada com 10 camadas	36
Figura 36 - Construção com estratégia quadrada com 50 camadas	37

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 - Diferenças entre spray e curto circuito	6
Tabela 2 - Especificações do sensor de inclinação	15
Tabela 3 - Parâmetros para ajuste da soldagem.....	15
Tabela 4 - Parâmetros utilizados na fonte nos primeiros ensaios	15
Tabela 5 - Parâmetros novos	16
Tabela 6 - Parâmetros utilizados na construção da nova parede.....	18
Tabela 7 - Parâmetros utilizados na fonte no modo sinérgico.....	23
Tabela 8 - Características metrológicas termômetro infravermelho	25
Tabela 9 - Tabela de parâmetros	26
Tabela 10 - Temperaturas em cada camada.....	27
Tabela 11 - Tabela de temperatura com 60s de espera.....	28
Tabela 12 - Valores de temperatura com 30s de tempo de parada com resfriamento forçado	31
Tabela 13 - Temperaturas para 60s de tempo de parada com vazão de ar.....	32
Tabela 14 - Tabela de alturas das paredes	35

SUMÁRIO

1 INTRODUÇÃO	1
1.1 Objetivos	2
1.1.1 Objetivo Principal.	2
1.1.2 Objetivos Específicos.	2
1.2 Justificativa e Relevância.	2
2 FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA.....	3
2.1 Solda MIG/MAG convencional.	3
2.2 Processos de soldagem e a manufatura aditiva.	5
2.2.1 Processos utilizados na manufatura aditiva.	5
2.2.2 Influência da temperatura na manufatura aditiva a arco.	6
2.2.3 Estratégias de construção de paredes.	7
2.3 Programação do robô FANUC.....	8
3. MATERIAIS E MÉTODOS.....	10
4. DESENVOLVIMENTO	13
4.1. Programa para a construção das primeiras paredes.	13
4.2. Parametrização e análise de estabilidade no processo de soldagem MIG/MAG no modo convencional normal.	14
4.3. Troca do programa da ponte e do programa no TP.....	20
4.3.1. Testes com as novas programações.....	22
4.4 Parametrização e análise no modo convencional sinérgico.	23
4.5 Aquisição e análise da temperatura no modo convencional sinérgico.....	24
4.5.1 Metodologia para a aquisição de temperatura por camada.	24
4.5.2 Resultados das análises de temperatura.	26

4.6 Implementação do sistema de resfriamento forçado.	29
4.6.1 Análise da temperatura com resfriamento forçado.....	31
4.7 Medições de altura para comparação entre resfriamento forçado e não forçado.....	34
4.8 Resultados com manufaturas de diferentes formatos de construção.	36
5 CONCLUSÕES E SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS	37
5.1 Conclusões.	37
5.2 Sugestões para trabalhos futuros.	38
6 BIBLIOGRAFIA	39
APÊNDICE A – PROGRAMA DO ROBÔ EM ZIG.....	41
APÊNDICE B – PROGRAMA DO ROBÔ EM ZIG-ZAG	43

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

Im	Corrente de soldagem
Vs	Velocidade de soldagem
Va	Velocidade do arame de soldagem
Vr	Tensão de soldagem
Ks	Impedância de subida da corrente de soldagem
Kd	Impedância de descida da corrente de soldagem
DBCP	Distância de bico de contato à peça
TP	Teach Pendant
MIG	Metal Inactive Gas
MAG	Metal Active gas
TIG	Tungsten Inert Gas
MOP	Laboratório de Máquinas Operatrizes
DAMM	Departamento de Metal Mecânica

1 INTRODUÇÃO

A demanda de produtos no setor metal mecânico nacional e internacional cresce anualmente. Esse crescimento é acompanhado por uma série de requisitos impostos às fábricas, como um bom relacionamento com os clientes, valores condizentes com os produtos, tempo de fabricação e entrega cada vez menores, e, acima de tudo, a qualidade dos produtos finais. Com o intuito de suprir essas exigências, a automatização dos processos industriais é amplamente utilizada nas fábricas mundo afora devido ao seu grande potencial de repetibilidade, lucro e economia de tempo. Um dos grandes aliados dessa automação são os robôs de solda, escassos ainda em território nacional, mas muito presentes em fábricas no exterior.

Um dos assuntos com crescente enfoque na área citada é a manufatura aditiva ou impressão 3D via deposição metálica, que vem crescendo ao redor do mundo nas últimas décadas (Hu *et al.*, 2017). A manufatura aditiva é uma tecnologia que possibilita a fabricação de peças difíceis pela deposição de material camada a camada (XIONG; YIN; ZHANG, 2016). Esse tipo de manufatura pode criar objetos de diferentes formas e materiais além de possuir uma maior eficiência quando comparado aos modos de manufatura subtrativos. O atual foco da técnica citada é a construção de peças metálicas funcionais que podem ser utilizadas na área automobilística, de defesa e aeroespacial (Pan *et al.*, 2015).

Existem diversos tipos de processos de soldagem que são utilizados na manufatura aditiva metálica. Um deles é o GMAW (*Gas Metal Arc Welding*), também conhecido como MIG/MAG, devido a sua alta taxa de deposição, baixo custo, operação automatizada e excelentes propriedades mecânicas (Hu *et al.*, 2017). Existem também estudos sobre o comportamento da temperatura na manufatura aditiva, porém é geralmente utilizado uma câmera térmica ou infravermelha para a aquisição das imagens e da temperatura, como apresentado por Xiong, Yin e Zhang (2016).

Devido a essa ampliação do mercado da manufatura aditiva metálica e o alto investimento que está sendo feito na área, o trabalho tem como finalidade a parametrização do processo de soldagem MIG/MAG convencional para a

manufatura aditiva, utilizando um robô antropomorfo para a automatização do processo, bem como a análise de temperatura das diversas camadas que compõem um objeto construído via manufatura aditiva metálica.

1.1 Objetivos

1.1.1 Objetivo Principal.

Parametrizar o processo de soldagem MIG/MAG convencional para a manufatura aditiva metálica com resfriamento forçado.

1.1.2 Objetivos Específicos.

- Parametrizar o processo de soldagem MIG/MAG convencional para aplicação na manufatura aditiva;
- Programar estratégias de construção;
- Avaliar se a programação que estava sendo utilizada na fonte era adequada para a manufatura aditiva.
- Avaliar o comportamento térmico entre camadas do processo de manufatura aditiva via MIG/MAG convencional;
- Desenvolver um sistema de resfriamento e avaliar a interferência de sua aplicação no processo de soldagem para a manufatura aditiva;
- Avaliar qualidade dimensional de diferentes peças fabricadas por manufatura aditiva.

1.2 Justificativa e Relevância.

O processo de soldagem MIG/MAG convencional possui diversas aplicações nos processos de manufatura, principalmente devido à elevada taxa de deposição e aplicação em diferentes substratos. Se comparado a outros processos de soldagem, algumas vantagens podem ser indicadas como: possibilidade de ser executado em diferentes posições; possibilidade de alta taxa de deposição de material de adição; capacidade de trabalhar em velocidades elevadas; entre outras. Devido a essas características, o processo de soldagem MIG/MAG possui diversas aplicações, desde simples junções de chapas, até soldagem para revestimento e manufatura aditiva.

No processo de soldagem a arco, a manufatura aditiva já é uma realidade, sendo necessária a parametrização do processo, visando otimizar a qualidade superficial do cordão formado. Utilizando um robô de soldagem podem ser criadas desde peças simples, como paredes ou caixas, até peças extremamente complexas, que podem, por exemplo, ser aplicadas na área médica, com produção de próteses.

A manufatura aditiva metálica apresenta vantagens quando comparada aos processos de manufatura subtrativos comuns (torneamento e fresamento) por possuir a capacidade de construção de peças de grande porte diminuindo sua razão *buy-to-fly* (razão entre o peso da matéria prima utilizada para a fabricação de um componente e o peso do próprio componente).

Contudo, para que o produto final da manufatura aditiva utilizando o processo de soldagem possua uma qualidade boa, é necessário, em alguns casos, o cuidado com algumas descontinuidades presentes no processo, tais como porosidade, mordeduras, trincas.

2 FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA

2.1 Solda MIG/MAG convencional.

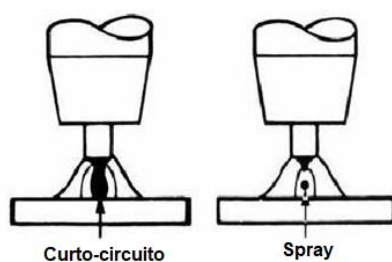
A alta capacidade de produção fez com que o processo de soldagem MIG/MAG se tornasse um dos mais importantes processos de união metálica na atualidade. A soldagem MIG/MAG convencional utiliza como fonte de calor o arco elétrico com gás de proteção, sendo a MIG, *metal inert gas* (gás metálico inerte) e

MAG, *metal active gas* (gás metálico ativo), onde um arco elétrico é estabelecido entre a peça e o material de adição. À medida que vai acontecendo a alimentação do arame, o arco vai fundindo o mesmo e gerando a poça de fusão. O fluxo de gás é responsável por gerar uma atmosfera protetora para o metal de solda. Esse processo de soldagem funciona com corrente contínua ou alternada, podendo ser utilizada o arame como polo positivo ou negativo, porém o mais utilizado é o com o arame sendo o polo positivo. O arame como polo negativo é raramente utilizado por conta da transferência deficiente do metal fundido do arame de solda para a peça (ESAB, 2005).

O processo de soldagem MIG/MAG é facilmente automatizado, sendo usados robôs de solda para a tarefa. Porém, ela é mais facilmente encontrada como um processo semiautomático, onde a alimentação do arame de soldagem é feita por um alimentador motorizado. No modo convencional, as fontes utilizadas são em sua grande maioria do tipo tensão constante, consequentemente, o comprimento do arco e a velocidade de arame também são praticamente constantes, já os valores de corrente e o comprimento energizado do eletrodo estão ligados a grandezas ajustadas e à distância da tocha à peça (MARQUES; MODENESI; BRACARENSE, 2009).

Quando se utiliza uma baixa tensão e baixa corrente na soldagem, tem-se uma transferência metálica por curto circuito, contudo esse modo de transferência pode gerar uma grande taxa de respingos, fazendo-se necessária a correção dos parâmetros da soldagem a fim de estabilizar o processo. Uma das formas de corrigir os respingos é utilizar altos níveis de energia, gerando uma transferência metálica conhecida como “*spray*”. A figura 1 apresenta um demonstrativo dos dois tipos de transferência citados anteriormente.

Figura 1 - Comparação entre transferências



Fonte: ESAB (2005), Adaptado

O processo MIG/MAG convencional é a opção em que a fonte de energia é do tipo tensão constante (Manual de Instruções DIGIPLUS A7, 2015). Existem dois tipos de processos MIG/MAG convencional na fonte utilizada, o modo convencional normal, e o modo convencional sinérgico.

2.2 Processos de soldagem e a manufatura aditiva.

A manufatura aditiva é uma grande promessa para diversas áreas, sendo a área de soldagem uma delas. Essa técnica cria objetos a partir da deposição de material, camada por camada. A manufatura aditiva a arco pode utilizar materiais como titânio e níquel, fazendo com que a sua utilização seja bastante promissora para a aplicação na indústria aeroespacial (DING et al., 2015).

2.2.1 Processos utilizados na manufatura aditiva.

Existem algumas técnicas para a criação de objetos por meio da manufatura aditiva, como a sinterização a laser e a manufatura por arame e arco.

A sinterização a laser é um processo de impressão 3D que utiliza pó metálico. É adicionado o pó por meio de um alimentador direcionado ao local de aplicação, e então o laser é acionado, derretendo o pó e formando uma camada. Depois de repetidas camadas, tem-se uma estrutura formada. É possível construir objetos de formas complexas por esse tipo de manufatura que não poderiam ser obtidos por métodos mais convencionais. Devido a utilização de laser, a sinterização é um processo que requer um investimento financeiro maior, porém, esse processo possui a vantagem de transferir menos calor para a peça base.

Já a manufatura aditiva por arame e arco é um processo mais barato e que possui uma maior taxa de deposição quando comparado ao laser, porém menos estável e com uma maior transferência de calor envolvida no processo. Para que a estrutura fique rígida e consistente é preciso uma parametrização específica, visto que a corrente utilizada não pode ser muito elevada, pois quanto maior a corrente

utilizada no processo, maior o calor transmitido para as camadas inferiores e chapa base.

2.2.2 Influência da temperatura na manufatura aditiva a arco.

Como a manufatura aditiva se dá pela sobreposição de camadas, é de suma importância que não haja uma grande concentração de calor na peça, para que as camadas não comecem a ficar deformadas no decorrer do processo. O calor na manufatura aditiva é perdido por duas formas, condução e convecção. Com a adição de camadas, o calor começa a ficar mais concentrado já que a transferência do mesmo por condução é dificultada. A primeira camada possui a chapa de base para dissipar seu calor, já as camadas adjacentes possuem somente as camadas anteriores para cumprir essa tarefa, fazendo com que o aporte térmico aumente.

Visto que a corrente utilizada no processo não deve ser muito elevada, tem-se como consequência, a transferência metálica por curto circuito, caso haja aumento de corrente a transferência metálica se altera para modo *spray*. A tabela 1 ilustra essa diferença de corrente entre os métodos utilizando um gás de proteção com 98% de Argônio e 2% de O₂.

Tabela 1 - Diferenças entre spray e curto circuito

Diâmetro do arame (mm)	Corrente mínima para curto circuito estável (A)	Corrente mínima para spray (A)
0,76	50	150
0,89	75	165
1,10	100	220

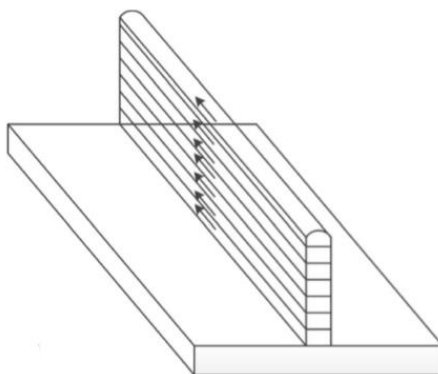
Fonte: Elaboração própria

Uma das técnicas de construções é a utilização do tempo de espera entre camadas. Esse tempo tende a ficar maior nas camadas mais altas. Para diminuir esse tempo entre camadas, é comum a utilização de métodos de resfriamento, como água ou algum outro tipo de material refrigerante, para que a produtividade aumente.

2.2.3 Estratégias de construção de paredes.

É importante observar que o sentido do cordão muda a estrutura do objeto formado. Quando o cordão sempre inicia no mesmo ponto ocorre uma convexidade na poça de fusão, fazendo com que o início do cordão fique mais alto. Já com o final do cordão acontece o contrário, e há um rebaixamento do cordão. Caso o sentido de soldagem seja sempre o mesmo (Figura 2), utilizando-se o termo “ZIG” para essa forma de construção, com a adição de camadas a parede terá uma visível diferença de altura entre o seu início e o seu final, como mostrado na figura 3. A diferença de altura entre a abertura e o fechamento do arco irá aumentar de acordo com o número de camadas que for depositada (XIONG; YIN; ZHANG, 2016).

Figura 2 - Sentido de soldagem em uma direção



Fonte: XIONG; YIN; ZHANG (2016), adaptado

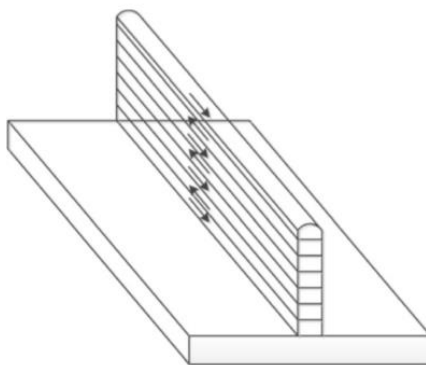
Figura 3 - Parede com diferença de altura



Fonte: XIONG; YIN; ZHANG (2016), adaptado

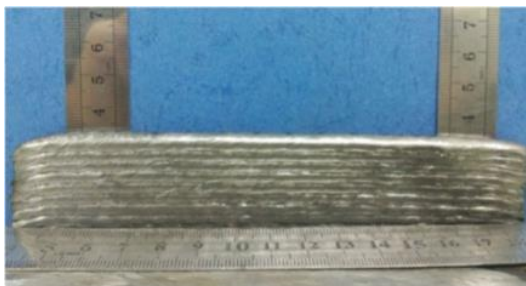
Para que esse problema seja resolvido, é invertido o sentido de soldagem em cada camada (figura 4), alterando a forma de construção para “ZIG-ZAG”, fazendo com que o a maior altura do início de um cordão compense a menor do anterior, melhorando a aparência da parede, como pode ser visto na figura 5.

Figura 4 - Sentido de soldagem em duas direções



Fonte: XIONG; YIN; ZHANG (2016), adaptado

Figura 5 - Parede nivelada



Fonte: XIONG; YIN; ZHANG (2016), adaptado

2.3 Programação do robô FANUC.

Uma das maneiras de se programar o robô é utilizando o “Teach-Pendant” (Figura 6), que por praticidade é chamado de TP, o qual acompanha o controlador, já disponibilizado pela FANUC.

3. MATERIAIS E MÉTODOS

Todo o estudo foi realizado no Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia de Florianópolis. Foram utilizados três laboratórios para a realização deste trabalho, sendo eles: MOP (Laboratório de Máquinas Operatrizes), laboratório de soldagem e o laboratório de metrologia.

Os equipamentos que foram utilizados são dispostos pelo Departamento Acadêmico de Metal-Mecânica (DAMM). A base do estudo foi realizada com a célula de soldagem robotizada, localizada no laboratório de soldagem. Essa célula é composta pelo robô FANUC M10iA, fonte de soldagem IMC DIGIPLUS A7 e o controlador R30iA.

A fonte de soldagem da empresa IMC possui uma corrente de soldagem de até 800A. Ela é uma fonte transistorizada, com chaveamento no secundário do transformador, permitindo o controle dos parâmetros de soldagem. Essa fonte disponibiliza ao usuário alguns processos de soldagem, sendo eles: MIG/MAG pulsado e curto-circuito, eletrodo revestido, TIG/plasma podendo ser com corrente contínua ou alternada e arco submerso. A fonte é acompanhada de um alimentador de arame automático e uma unidade de refrigeração, ambos apresentados na figura 7.

Figura 7 - Fonte de soldagem IMC



Fonte: elaboração própria

Esse modelo de fonte possui dois modos de soldagem quando no MIG/MAG convencional, o modo normal e o modo sinérgico, sendo ambos de tensão constante. O modo convencional normal exige um maior conhecimento do usuário no momento da inserção dos parâmetros, pois ele deve informar todas as variáveis do processo, sendo elas: tensão de referência (V_r), Velocidade do arame (V_a), dinâmica de subida da corrente (K_s) e dinâmica de descida da corrente (K_d). A figura 8 demonstra o display da fonte com as variáveis citadas.

Figura 8 - Display no modo convencional normal



Fonte: elaboração própria

Já o modo convencional sinérgico, quando comparado ao convencional normal, é de mais fácil utilização. Nele o usuário deve somente indicar qual o diâmetro do arame que está sendo utilizado, a corrente média (I_m) e a altura do arco (a). A figura 9 mostra o display da fonte com tais parâmetros. Os demais parâmetros que são utilizados no modo convencional normal são selecionados e controlados automaticamente pelo equipamento.

Figura 9 - Display fonte no modo convencional sinérgico



Fonte: elaboração própria

O robô FANUC, apresentado na figura 10 juntamente com o controlador, é um robô de manipulação antropomórfico que possui seis eixos. Ele possui capacidade de carga de 10kg e alcance máximo de 1,42m. Juntamente com o robô está o controlador R30iA, aparelho responsável por todo o controle de movimentação e sinais de entrada e saída do robô, sendo o mesmo programado via TP ou software off-line. A figura 11 apresenta a montagem completa com todos os equipamentos.

Figura 10 - Robô FANUC e controlador



Fonte: elaboração própria

Figura 11 - Montagem com todos os equipamentos



Fonte: elaboração própria

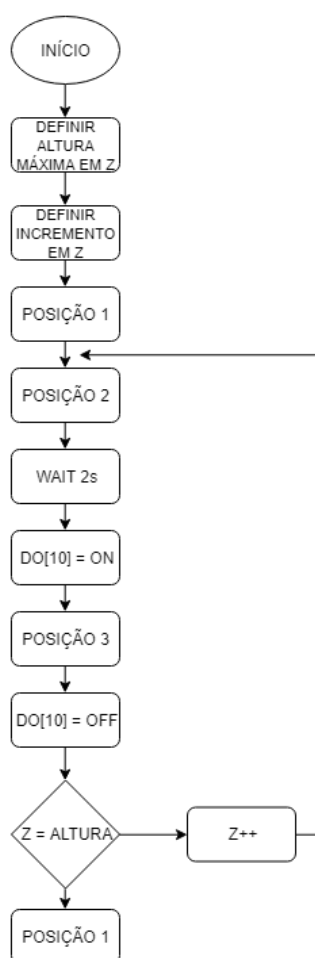
4. DESENVOLVIMENTO

4.1. Programa para a construção das primeiras paredes.

No início do trabalho foi definido que os testes para as parametrizações e as análises da manufatura aditiva seriam realizadas em estruturas com formas de paredes, devido à facilidade e à rapidez na produção dos mesmos.

Para que o processo ficasse mais repetitivo e rápido, foi criado um programa utilizando o TP do robô. O fluxograma da figura 12 demonstra a lógica de programação utilizada.

Figura 12 - Fluxograma de programação



Fonte: elaboração própria

O usuário deve primeiramente informar qual a altura que ele deseja que o robô atinja no eixo Z. Posteriormente ele define qual o incremento em Z de cada camada. A posição um é a posição de “home”, mais afastada da chapa base, a posição dois é a de início do cordão, já ajustada de acordo com a DBCP (Distância Bico de Contato Peça) e a posição três é a posição final do cordão. A saída digital DO[10] é a responsável por acionar e desacionar a fonte de soldagem. Ao final do cordão, o programa analisa a altura do robô em um laço de repetição: caso a mesma já esteja igual à requerida pelo usuário o robô volta para a posição de home; caso contrário, ele dá um incremento em Z e retorna para o início do cordão, continuando o processo. Esse primeiro programa realiza a soldagem somente em um sentido. O programa utilizado está em anexo no apêndice A.

4.2. Parametrização e análise de estabilidade no processo de soldagem MIG/MAG no modo convencional normal.

A fonte de soldagem utilizada no desenvolvimento do trabalho necessita que alguns parâmetros de soldagem sejam informados, como já descrito anteriormente. O primeiro modo de soldagem utilizado e testado foi o modo convencional normal. Como o objetivo do trabalho era a parametrização e análise da manufatura aditiva era necessário que a corrente utilizada no processo não fosse muito elevada devido à grande quantidade de calor que fica armazenada na peça. Porém era necessário que o processo estivesse estabilizado, não gerando muitos respingos e com boa regularidade nos curtos circuitos.

Foi utilizado um arame para soldagem de 1mm de diâmetro em todos os ensaios. Para o ajuste da DBCP foi utilizado um paquímetro da marca DIGIMESS, com precisão de 0,5mm. A vazão de gás foi confirmada com um medidor externo acoplado ao bocal de gás, para averiguar se havia alguma diferença entre o medidor na saída do cilindro e o bocal. Para o nivelamento da mesa de soldagem e da tocha foi utilizado um aplicativo de celular, cujas especificações estão presentes na tabela 2, que faz a medição dos ângulos por meio de um acelerômetro.

Tabela 2 - Especificações do sensor de inclinação

Marca	Sensor	Faixa de medição	Incerteza	Resolução
iPhone SE	Bosch-Sensortec (BMA 220)	0 a 360°	±1°	1°

Fonte: elaboração própria

Tabela 3 - Parâmetros para ajuste da soldagem

Vg (L/min)	DBCP (mm)	Ângulo da mesa com a horizontal (°C)	Ângulo da direção de soldagem (°C)	Ângulo de ataque da tocha (°C)
15	10	0	90	0

Fonte: elaboração própria

Os parâmetros externos à fonte utilizados estão presentes na tabela 3, O gás de proteção utilizado nesse ensaio foi uma mistura de 98% de argônio com 2% de oxigênio. Para os testes iniciais foram realizados cordões com 50mm de comprimento para a análise da estabilidade do processo, sendo programados 10 cordões sobrepostos, com um incremento no eixo Z de 1,5mm a cada cordão. Os parâmetros que foram utilizados na fonte de soldagem estão dispostos na tabela 4.

Tabela 4 - Parâmetros utilizados na fonte nos primeiros ensaios

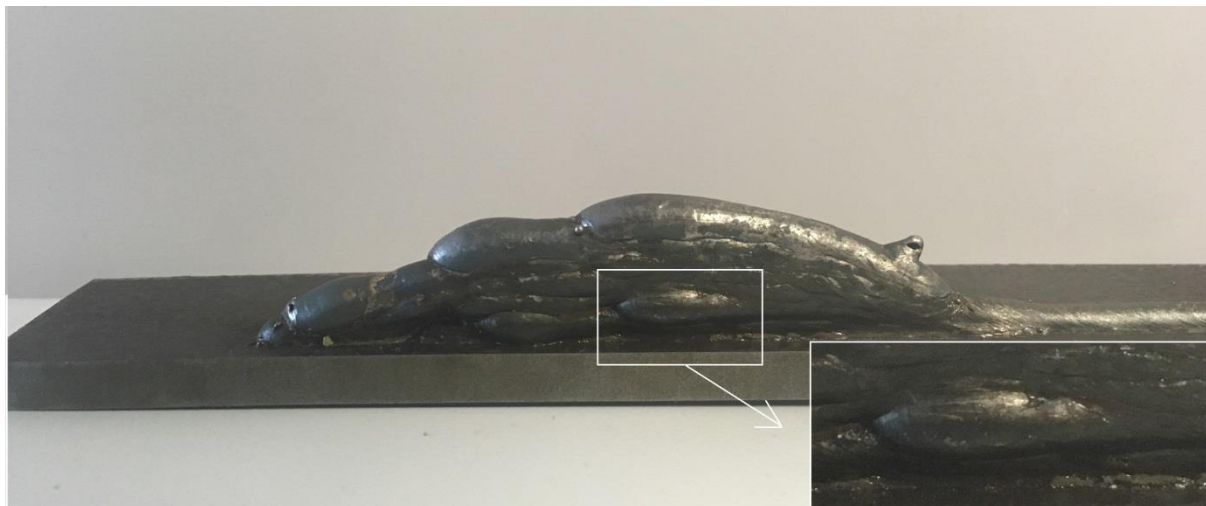
Um (V)	Im (A)	Va (m/min)	Vs (cm/min)	dt(s)
19	172	6	40	300

Fonte: elaboração própria

A figura 13 mostra o resultado do primeiro teste realizado. É possível analisar que as camadas possuem uma aparência de que foram derretidas, criando barrigas nas laterais devido à corrente que foi imposta ao processo. Existe um termo no meio da manufatura aditiva para essa característica, sendo o mesmo, molhabilidade. Percebe-se também que as camadas mais inferiores começaram a apresentar um maior molhamento no decorrer da adição das camadas posteriores, como mostrado no *zoom* presente na figura 13. Devido à má formação da parede, apresentando uma grande molhabilidade devido ao grande aporte térmico envolvido, o processo foi

interrompido no cordão de número 6, não chegando a formar uma parede com 10 camadas.

Figura 13 - Primeira parede confeccionada



Fonte: elaboração própria

Com a propósito de diminuir as deformidades causadas pela alta corrente, e consequente acúmulo de calor na peça, foram utilizados outros parâmetros de soldagem, diminuindo-se a tensão, a velocidade de arame, e aumentando a velocidade de soldagem. Para que houvesse uma maior dissipação de calor começou-se a utilizar chapas de dezesseis milímetros de espessura como chapa base. Foi também modificada a DBCP do robô. A tabela 5 demonstra os parâmetros que foram utilizados.

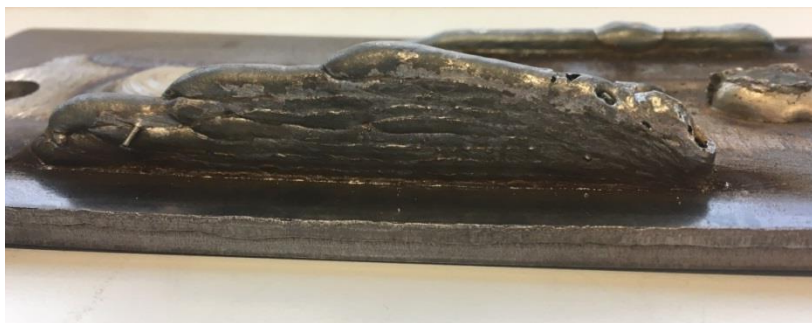
Tabela 5 - Parâmetros novos

Im(A)	Um(V)	Va(m/min)	Vs(cm/min)	Vg(l/min)	DBCP(mm)	dt(s)
128	18,5	5,6	50	15	14	300

Fonte: elaboração própria

A velocidade de soldagem maior diminui o aporte térmico, colaborando na formação de uma parede com um aspecto menos molhado. É possível perceber que a corrente que foi utilizada no processo diminui em comparação aos dados apresentados na tabela três. A figura 14 mostra a parede formada utilizando os dados apresentados na última tabela.

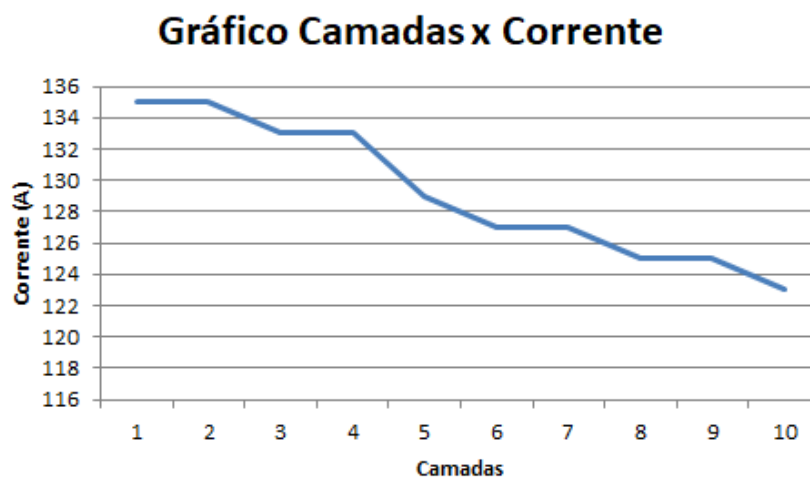
Figura 14 - Parede formada com parâmetros mais bem ajustados



Fonte: elaboração própria

Como citado anteriormente, percebe-se uma grande melhoria em comparação à primeira parede confeccionada, apresentada na figura 13. Nesta parede demonstrada na figura 14, já é possível perceber as camadas mais bem definidas, sem o aspecto de molhadas, apresentando uma maior regularidade. Foram registradas as correntes que foram aplicadas em cada camada, como mostrado no gráfico abaixo.

Figura 15 - Gráfico da variação da corrente em função do número de camadas



Fonte: elaboração própria

A diminuição da corrente no decorrer da adição de camadas acontece devido a não existência de um controle do comprimento do arco no controlador. Como não há uma regularidade na altura das camadas adicionadas esse comprimento vai aumentando a cada camada. A altura das camadas vai diminuindo no decorrer do processo, pois quando a camada superior é adicionada as que estão abaixo dela também são aquecidas, fazendo com que haja um assentamento das camadas,

diminuindo assim a altura final da parede. Como o incremento da altura do robô é fixo, acaba acontecendo um afastamento do bico de contato maior do que o que está programado, aumentando a resistência e reduzindo a corrente.

Mesmo a segunda parede tendo apresentado uma melhor formação que a anterior foi construída outra parede utilizando o modo convencional normal MIG/MAG. Após testes com diferentes parâmetros foi construída a parede utilizando os valores apresentados na tabela 6.

Tabela 6 - Parâmetros utilizados na construção da nova parede

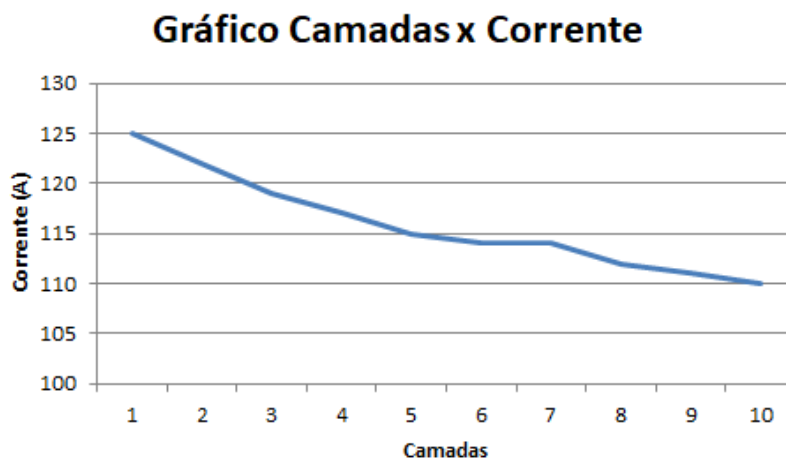
Im (A)	Um (V)	Va (m/min)	Vs (cm/min)	Vg (l/min)	DBCP (mm)	dt (s)
114,5	16,7	5,2	60	15	14	300

Fonte: elaboração própria

Assim como na parede anterior, mostrada na figura 14, foi analisada a corrente em todas as camadas da parede, apresentando o mesmo comportamento já descrito. A figura 16 apresenta esses valores em formato de gráfico para uma visualização mais fácil.

É possível perceber que a curva da figura 16 apresenta uma menor variação no eixo y (corrente) quando comparada a da figura 15. Devido a essa menor variação na corrente a aparência da parede ficou visivelmente melhor, com menos aspecto de molhada. A figura 17 mostra a parede em questão.

Figura 16 – Gráfico da corrente em função das camadas utilizando na fonte os valores da tabela 6



Fonte: elaboração própria

Figura 17 - Parede com parâmetros melhor ajustados

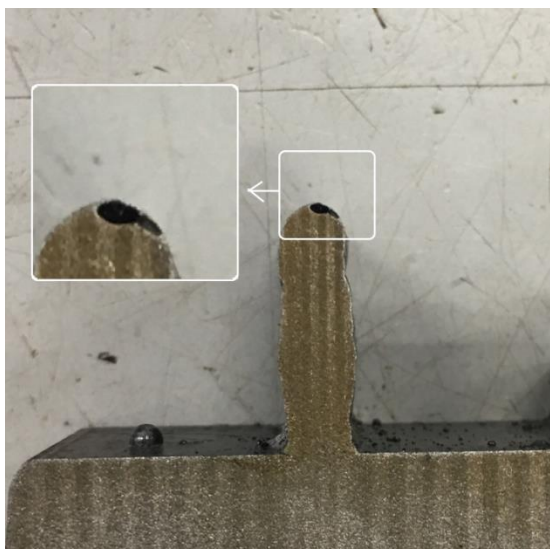


Fonte: elaboração própria

O seu início apresenta uma deposição maior de material, devido à abertura do arco elétrico. Já o final, uma falta de deposição, por conta do fechamento do arco. Como já citado no item 2.3.3, esse comportamento era esperado, pois o sentido de soldagem para a criação da parede era sempre o mesmo. Além do problema de maior deposição, percebeu-se que o programa que estava sendo utilizado na fonte de soldagem não era o mais adequado para a manufatura aditiva. O programa era um MIG/MAG convencional, porém com um modo de abertura de arco diferenciado. Para que o arco fosse aberto era necessário que o arame estivesse em contato com a peça, para que houvesse um preaquecimento do mesmo. Após o tempo de aquecimento, o robô deveria desfazer o contato do arame com a peça, abrindo-se o arco. Esse modo de abertura é mais vantajoso para algumas aplicações, pois o mesmo apresenta uma abertura de arco mais suave, com menos respingos. Porém, para a manufatura aditiva ele não se demonstrou o mais eficaz, devido à dificuldade de abertura dos arcos nas camadas mais elevadas.

Além dos problemas com abertura de arco, essa parede também apresenta defeitos de formação. São encontrados poros no topo da última camada no meio do cordão e no seu final. Essa porosidade é um problema para a manufatura aditiva, podendo alterar a forma e resistência do produto final. Para analisar o interior da parede, foi feito um corte transversal na mesma, utilizando a máquina de eletroerosão a fio para reduzir a perda de material da superfície cortada, visto que a máquina citada não impõe muita força no momento do corte, deixando a superfície com um melhor acabamento. A figura 18 mostra esse corte realizado.

Figura 18 - Corte transversal



Fonte: elaboração própria

Como esperado, havia um poro formado na parte superior do cordão, destacado na figura 18. A parede apresenta uma boa formação nas camadas inferiores, deixando claro que o problema com porosidade aparece no decorrer do processo, com o aumento da altura da parede.

4.3. Troca do programa da ponte e do programa no TP.

Algumas estratégias foram tomadas para tentar corrigir os problemas apresentados nas formações das paredes da seção anterior. Primeiramente foi alterado o programa da fonte, sendo instalado na mesma uma programação de MIG/MAG convencional, com abertura padrão, para um maior controle na posição de abertura do arco na manufatura aditiva. O programa foi fornecido pela empresa fabricante do aparelho, sendo somente a instalação sendo realizada no IFSC.

Para a programação da fonte é necessário utilizar um cabo, do tipo TLL, para a transferência do programa do computador para o aparelho. Essa transferência é realizada por meio de um software instalado em computador, juntamente com um cabo próprio para a programação da fonte (Figura 19). Esse cabo é conectado na

fonte, e possui um botão ligado nele. Para que a fonte entre no modo de programação o botão deve ser pressionado ao ligar o aparelho. Após isso, é somente necessária a transferência do novo programa para a fonte.

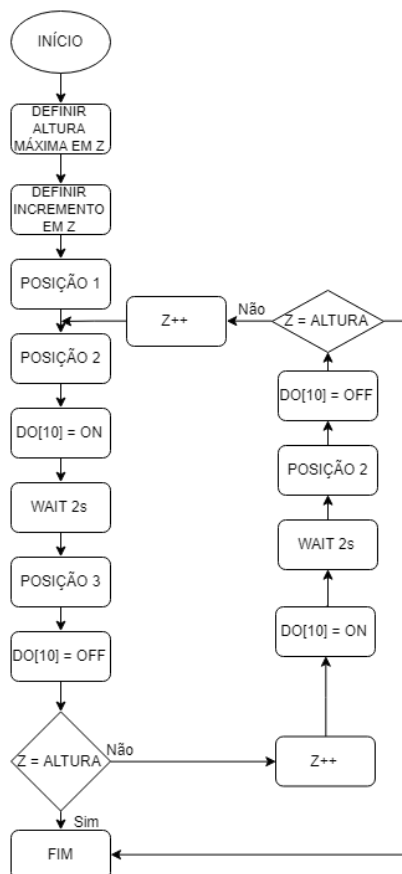
Figura 19 - Cabo utilizado para a transferência do programa para a fonte



Fonte: Baranenko, adaptado

Com o novo programa da fonte instalado, foi desenvolvido outro programa no TP do robô. O fluxograma apresentado na figura 20 mostra a lógica da nova programação.

Figura 20 - Fluxograma de sentido duplo de soldagem



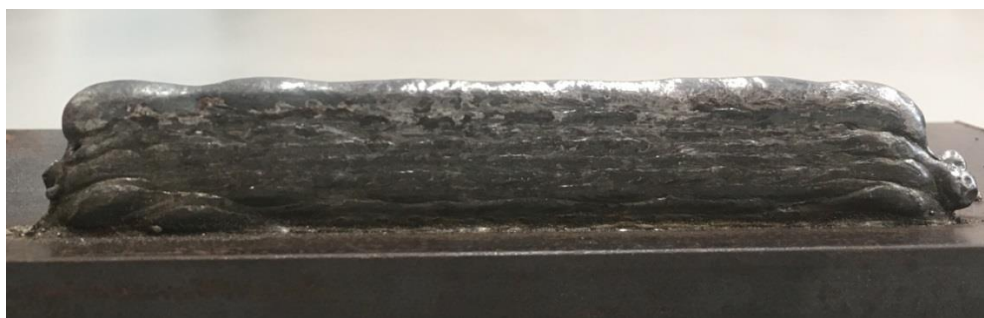
Fonte: elaboração própria

Esse novo programa realiza a soldagem nos dois sentidos da parede, diferentemente do primeiro utilizado que só realizava a deposição de material em um sentido. O programa foi feito com o intuito de remover a diferença de altura que as paredes apresentavam no início e no final das camadas. A programação utilizada está disponível em anexo no apêndice B.

4.3.1. Testes com as novas programações.

Com os novos programas prontos e devidamente instalados foram realizadas novas baterias de testes. Assim como nos testes anteriores, foram realizadas paredes com dez camadas, porém, nesses novos ensaios foi estipulado um comprimento de 100mm à estrutura. A figura 21 apresenta a primeira parede realizada com as novas programações.

Figura 21 - Parede com programa novo



Fonte: elaboração própria

Há uma melhora nítida na regularidade de abertura de arco, podendo ser analisada pela parede possuir inícios e finais coincidentes, comprovando que o programa instalado na fonte é mais adequado para a manufatura aditiva quando comparado ao anterior. É também possível analisar a melhoria da estrutura quando se utiliza a estratégia de construção em “ZIG-ZAG”, fazendo com que o acúmulo de material que existe no início de um cordão compense a falta no final do anterior, deixando a parede mais nivelada quando comparada às construídas com somente um sentido de soldagem.

Os parâmetros utilizados nessa parede foram os mesmos da tabela 6. A corrente média do processo foi praticamente a mesma, apresentando uma pequena variação em algumas camadas, como na sexta camada, que na parede anterior apresentou uma corrente de 114A, e nessa teve uma redução para 113A. Ao final da construção, a corrente média foi de 114A.

4.4 Parametrização e análise no modo convencional sinérgico.

Buscando-se uma menor corrente no processo começou-se a utilizar o modo de soldagem convencional sinérgico. Também foi alterado o gás de proteção que era utilizado, passando o mesmo a ser o CORGON 20, que apresenta em sua composição 20% de dióxido de carbono e 80% de argônio. Esse gás apresenta um desempenho elevado para transferências por curto circuito. Como já descrito no item três, o modo sinérgico possuiu uma maior facilidade no momento de parametrização devido ao seu maior automatismo na seleção das variáveis de soldagem, sendo possível atingir uma menor corrente com mais facilidade do que no modo normal.

Para testar o modo sinérgico foi construída uma parede com dez camadas, utilizando os parâmetros apresentados na tabela 7 abaixo.

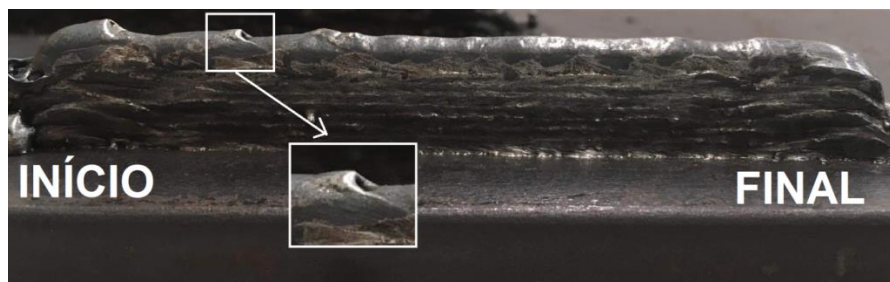
Tabela 7 - Parâmetros utilizados na fonte no modo sinérgico

Im(A)	a	Vs(cm/min)	Vg(l/min)	DBCP(mm)	dt(s)
100	-1	60	15	14	300

Fonte: elaboração própria

Os valores utilizados de DBCP, velocidade de soldagem, vazão de gás e intervalo de tempo entre camadas, foram os mesmos utilizados anteriormente. Porém, no modo sinérgico, é informada a corrente média do processo e a altura do arco. Com a corrente média de 100 A colocada na configuração da fonte, o processo apresentou uma corrente menor a cada camada do que a apresentada no modo convencional, possuindo uma corrente média de 77 A. O modo sinérgico utilizando esses parâmetros apresentou uma diminuição de 37,5 A. A figura 22 a seguir, mostra a parede criada com os parâmetros informados.

Figura 22 - Parede criada no modo sinérgico



Fonte: elaboração própria

É perceptível a melhoria na parede criada com o modo sinérgico. As camadas se apresentam bem mais definidas, sem aspecto de molhadas e com uma grande uniformidade. Porém são notadas algumas porosidades no início do cordão, como destacado na figura 22 já apresentada. Uma das causas desse problema é a instabilidade na abertura do arco, que cria zonas de turbulência para a formação da atmosfera. Para corrigir esse problema foi aumentada a corrente do modo sinérgico, passando-a para 110A. Foi realizada uma nova parede e comprovou-se que a alteração do parâmetro retificou o problema citado.

4.5 Aquisição e análise da temperatura no modo convencional sinérgico.

Para a aquisição e análise da temperatura foi utilizada a mesma estrutura em forma de parede, como as já apresentadas anteriormente, e o mesmo gás de proteção CORGON 20.

4.5.1 Metodologia para a aquisição de temperatura por camada.

Após os testes iniciais com o modo de soldagem sinérgico terem sido concluídos, deu-se início ao estudo da temperatura em cada camada da manufatura aditiva. Esse estudo é importante para um melhor entendimento do comportamento da temperatura ao longo da criação de objetos pela manufatura aditiva via deposição metálica, melhorando assim o desempenho da mesma.

Para a medição da temperatura foi utilizado o termômetro infravermelho digital, da marca SELECTECH, e modelo SE-700. A figura 23 apresenta o aparelho em questão.

Esse aparelho possui algumas características metrológicas, que estão apresentadas na tabela 8.

Figura 23 - Termômetro Infravermelho



Fonte: elaboração própria

Tabela 8 - Características metrológicas termômetro infravermelho

Marca	Selectech Electronics Co
Modelo	SE-700
Faixa de medição	-50 a 700°C
Repetibilidade	+/- 1°C
Emissividade	Ajustável de 0,1 a 1
Incerteza	+/- 1,5°C
Resolução	0,1°C
Tempo de resposta	500ms

Fonte: SELECTECH (2015 *apud* TEICHMANN, 2016, p.85)

Foi adotada uma metodologia para as medições, deixando-as mais padronizadas, para que os resultados não fossem afetados por diferentes posições ou distâncias. Esse modelo de termômetro possui um laser indicador para ajudar o operador a direcionar o sensor que capta a radiação emitida pelos corpos. Por

padrão, o laser era sempre apontado para o meio do cordão que havia sido confeccionado, a pistola era apoiada na parte lateral e frontal da tocha, conseguindo-se assim manter a distância que o termômetro ficava da peça. A figura 24 apresenta um exemplo de uma dessas medições. Eram feitas medições antes da abertura e após o fechamento do arco.

Figura 24 - Metodologia para medição da temperatura



Fonte: elaboração própria

4.5.2 Resultados das análises de temperatura.

Para a aquisição dos dados foram feitas paredes com diferentes tempos de parada entre camada, para obter-se uma amostragem maior com diferentes intervalos. O tempo de espera entre camadas foi diminuído, visto que a espera de trezentos segundos entre cada camada demanda um tempo muito grande de fabricação de uma peça, aumentando seu custo. A primeira parede realizada possuía os parâmetros apresentados na tabela 9 abaixo.

Tabela 9 - Tabela de parâmetros

Im(A)	a	Vs(cm/min)	Vg(l/min)	DBCP(mm)	dt(s)
110	-1	60	15	14	30

Fonte: elaboração própria

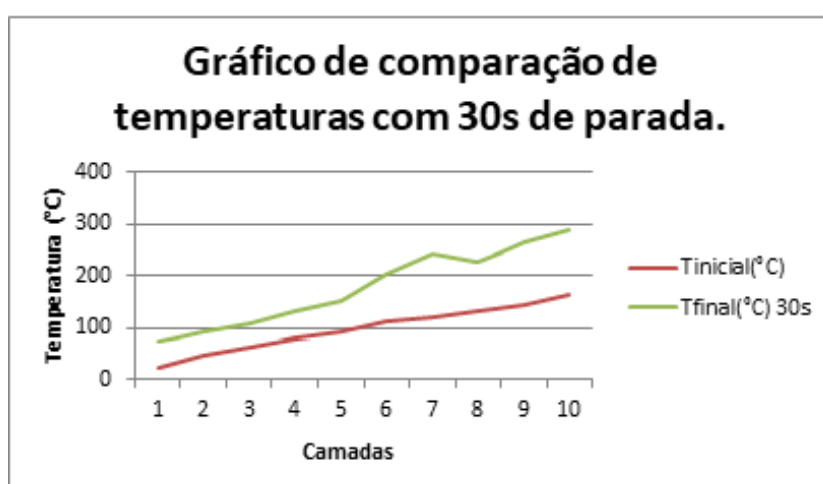
Com esses parâmetros e utilizando o termômetro infravermelho que já foi descrito, obtiveram-se os valores de temperatura indicados na tabela 10.

Tabela 10 - Temperaturas em cada camada

Camadas	Tinicial(°C)	Tfinal(°C)
1	22,7	74,2
2	47,2	92,8
3	62,6	109,7
4	82,7	131,2
5	93,8	152,2
6	113,6	203,9
7	118,3	242,8
8	130,7	226,7
9	142,8	266,3
10	163,1	286,5

Fonte: elaboração própria

Percebe-se, analisando a tabela, que com a adição de camadas, a temperatura vai aumentando cada vez mais quando comparada à temperatura inicial. A figura 25 apresenta um gráfico que descreve esse comportamento, aonde a linha de representação da temperatura final, vai se distanciando da temperatura inicial. Isso se deve ao maior aporte térmico, como já explicado anteriormente no item 2.3.2.

Figura 25 - Gráfico de comparação de temperaturas

Fonte: elaboração própria

Para que fosse realizada uma comparação de temperatura, foi confeccionada uma nova parede com os mesmos dados apresentados na tabela 8, porém com um

intervalo de tempo de 60s. A tabela 11 apresenta as temperaturas com esse tempo de espera entre camadas.

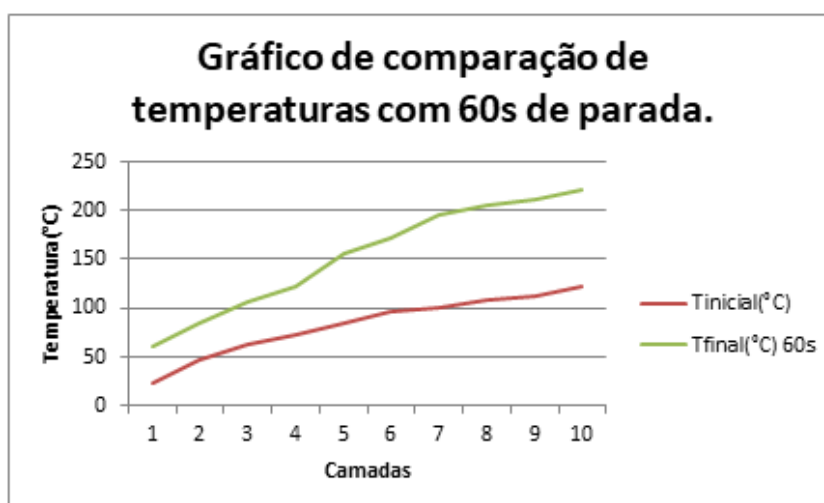
Tabela 11 - Tabela de temperatura com 60s de espera

Camadas	Tinicial(°C)	Tfinal(°C)
1	24,1	60,1
2	47,6	84,2
3	62	107
4	73,3	121,9
5	84,1	155,5
6	97,1	171,2
7	100,6	194,7
8	107,6	204,9
9	112,6	212
10	121,5	221,3

Fonte: elaboração própria

É notável a diferença de temperatura quando há um maior tempo de espera entre camadas, bem como a variação dessa temperatura quando comparada à inicial. A figura 26 apresenta abaixo, trás o mesmo gráfico já apresentado anteriormente pela figura 25, porém para um tempo de 60s de parada.

Figura 26 - Gráfico de temperatura para 60s de parada

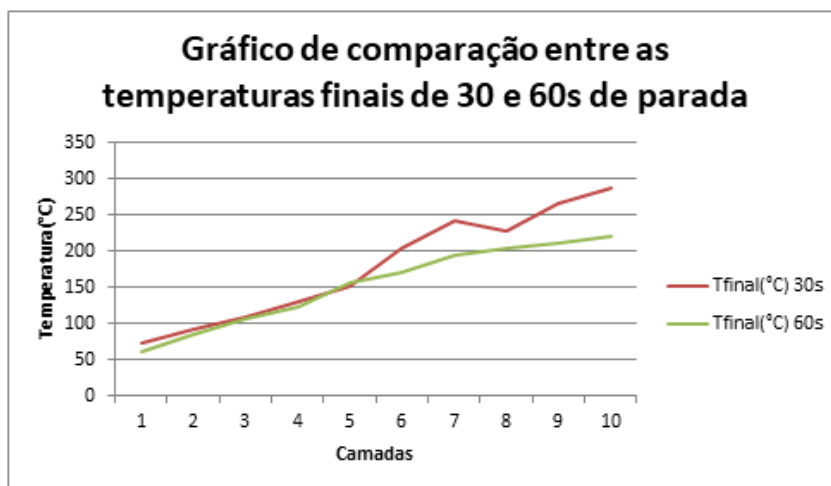


Fonte: elaboração própria

Comparando-se os gráficos das figuras 26 e 27, é possível perceber que o comportamento da temperatura final é o mesmo no decorrer da adição de camadas,

sempre se distanciando da temperatura inicial. Com os dados adquiridos no decorrer dos teste é possível confeccionar um gráfico de comparação entre os dois tempos de paradas entre camadas, como o mostrado na figura 27.

Figura 27 - Gráfico de comparação entre 30 e 60s



Fonte: elaboração própria

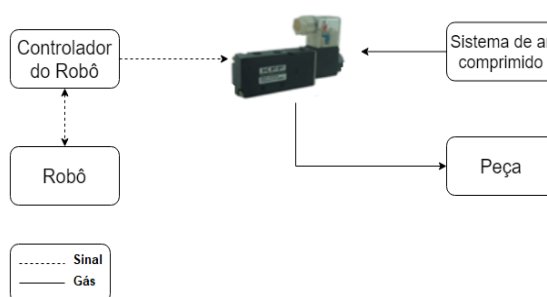
Com o auxílio do gráfico, fica clara a importância do tempo de espera entre camadas, bem como a variação da temperatura em função desse mesmo tempo de espera. Um problema do tempo de espera, é que ele é um tempo ocioso para a produção. Por esse motivo foi criado um sistema de resfriamento forçado via ar comprimido, ou seja, há a presença de algum agente externo, nesse caso o ar, que faz com que a peça seja resfriada mais rapidamente.

4.6 Implementação do sistema de resfriamento forçado.

Como citado e mostrado no final do item anterior, o tempo de resfriamento entre camadas é de grande valia quando se fala em manufatura aditiva na soldagem. Existem diversos modos de resfriamento, sendo eles forçado ou não. Os testes realizados anteriormente utilizavam o método não forçado, ou seja, o resfriamento se dava de forma natural, sem nenhum agente externo. Porém o tempo de parada entre camadas quando fosse feita uma peça pequena seria muito alto, devido ao baixo intervalo de tempo entre o início e o final do cordão, fazendo com que não haja tempo suficiente para o resfriamento de peça.

Para diminuir esse tempo de parada, foi adaptada uma eletroválvula na parte lateral da mesa de soldagem, para que a peça que estivesse em construção fosse resfriada com ar comprimido. Essa eletroválvula é de simples solenoide e foi ligada a uma das saídas digitais do controlador do robô. O programa utilizado no robô é responsável pela ativação da válvula, sendo o mesmo igual ao já apresentado na figura 20, com o acréscimo de um tempo de parada para que a válvula fosse acionada, e depois de um determinado tempo desligada entre cada camada. A figura 28 apresenta um diagrama de sinais do sistema.

Figura 28 - Diagrama de Sinais da eletroválvula



Fonte: elaboração própria

É importante salientar que o ar comprimido só deve ser aplicado sobre a peça quando o arco não estiver aberto, caso contrário a atmosfera protetora será removida.

A figura 29 a seguir mostra a válvula acoplada ao perfil de alumínio da mesa de soldagem. A pressão utilizada no sistema é de 25 psi.

Figura 29 - Eletroválvula acoplada



Fonte: elaboração própria

4.6.1 Análise da temperatura com resfriamento forçado.

Para que a eficiência do resfriamento forçado fosse comprovada, foram realizadas as mesmas aquisições de temperatura citadas anteriormente, com os mesmos parâmetros e tempos de parada entre camadas, porém com a eletroválvula para a passagem do ar comprimido incluída no sistema. Primeiramente, foi realizada a parede com trinta segundos de tempo de parada com o fluxo de ar aberto. A tabela 12 mostra os valores de temperatura adquiridos.

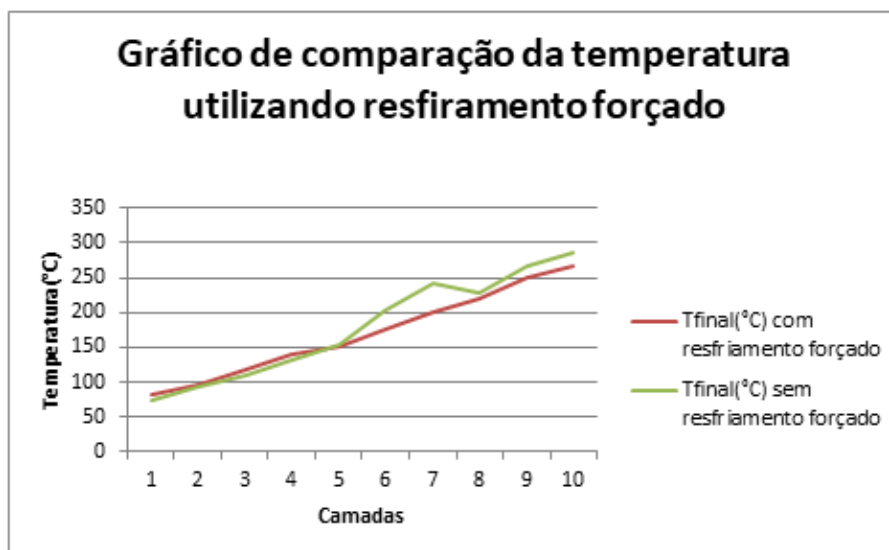
Tabela 12 - Valores de temperatura com 30s de tempo de parada com resfriamento forçado

Camadas	Tinicial(°C)	Tfinal(°C)
1	24,5	82,2
2	49	96,7
3	59,3	118,3
4	70,9	139,4
5	86,9	152,1
6	106,3	175,9
7	110,7	201,3
8	127,2	220,1
9	139,1	249,6
10	155,7	266,3

Fonte: elaboração própria

Com os dados da tabela 12, foi construído o gráfico apresentado na figura 30 fazendo a comparação entre a temperatura final sem o resfriamento forçado e com o resfriamento forçado.

Figura 30 - Gráfico de comparação de temperatura utilizando resfriamento forçado



Fonte: elaboração própria

Analisando o gráfico percebe-se que nas primeiras camadas não há uma vantagem em se utilizar o resfriamento forçado, devido à grande área que o calor ainda tem para se dissipar, porém, conforme vai aumentando o número de camadas essa situação muda, o que certifica que, para peças com maior altura, um resfriamento forçado garante um melhor resultado final.

Posteriormente foi construída uma parede com sessenta segundos de tempo entra camada com a vazão de ar ligada. A tabela 13 demonstra os valores de temperatura inicial e final coletados.

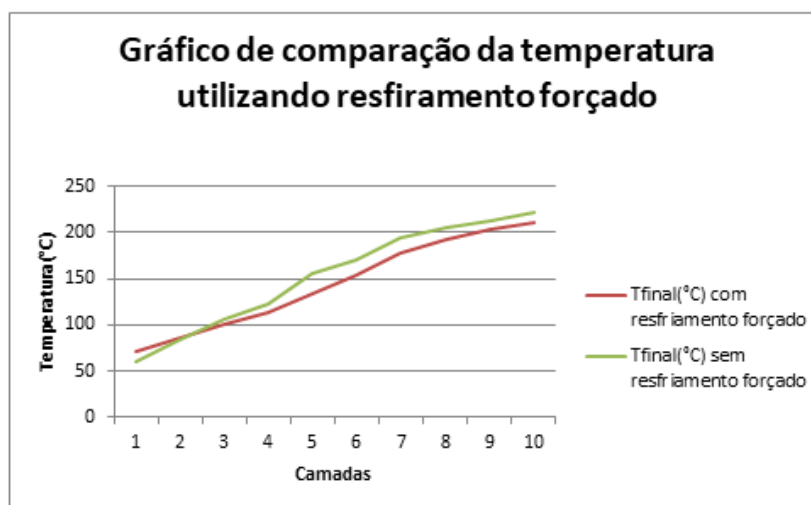
Tabela 13 - Temperaturas para 60s de tempo de parada com vazão de ar

Camadas	Tinicial(°C)	Tfinal(°C) 60s
1	25	72,1
2	46	85,2
3	55	100,8
4	67,8	112,7
5	72,3	134,1
6	76,8	153,6
7	83	177,3
8	91,3	192
9	92,2	203,6
10	80,8	218,2

Fonte: elaboração própria

O comportamento da temperatura apresentado no gráfico presente na figura 31 condiz com o esperado, visto que quanto maior o tempo com o ar comprimido ligado mais baixa deve ficar a temperatura. É visível também que, diferentemente das curvas apresentadas no gráfico da figura 30, a temperatura final já é mais baixa com o resfriamento forçado desde a segunda camada.

Figura 31 - Gráfico de temperatura com e sem resfriamento



Fonte: elaboração própria

Mesmo havendo uma diminuição na temperatura observa-se que a mesma não é muito grande, sendo de cerca de 4°C. Isso se deve ao posicionamento da saída de ar, que por estar na lateral da parede não à resfria igualmente, fazendo com que ainda houvesse um acúmulo de calor em seu interior.

Após todas as aquisições terem sido realizadas, um corte foi feito em uma das paredes construídas para uma análise interna dos cordões. A figura 32 apresenta esse corte realizado. Não são encontradas porosidades no interior da parede, demonstrando que o ar comprimido não afeta a formação de uma estrutura quando usado de maneira correta.

Figura 32 - Parede cortada para análise interna



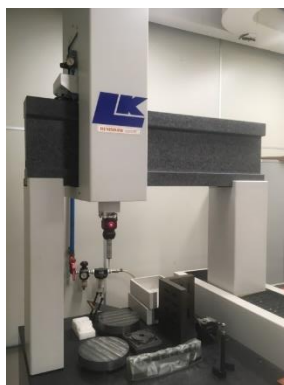
Fonte: elaboração própria

4.7 Medições de altura para comparação entre resfriamento forçado e não forçado.

Uma das preocupações da manufatura aditiva é com a penetração das camadas e com sua altura final. Como já descrito, há uma diferença entre a altura estipulada e a real, devido a não uniformidade da altura da camada, causada pela grande concentração de calor que faz com que a camada acabe cedendo para os lados.

Para analisar se o resfriamento forçado auxilia na correção desse problema foram medidas as alturas das paredes. Para a medição foi utilizada a máquina de medição por coordenadas LK G-80C da empresa RENISHAW (figura 33), com o apalpador RENISHAW SP25, com a esfera de 5mm, disponível no laboratório de metrologia do Departamento de Metal-Mecânica do IFSC.

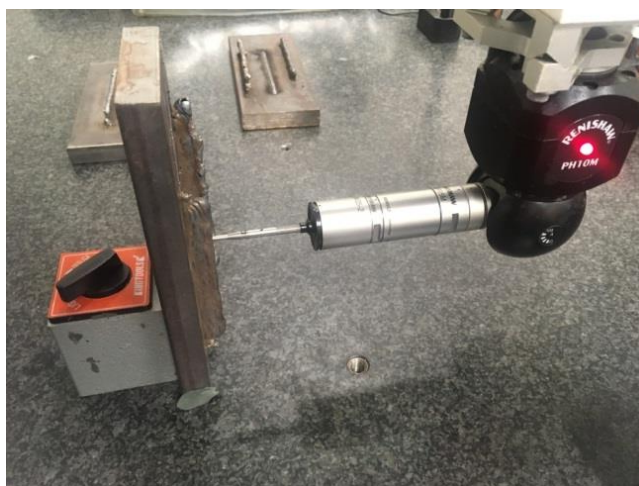
Figura 33 - Máquina de medição por coordenadas



Fonte: elaboração própria

Foram medidas cinco paredes, sendo uma sem tempo de parada, uma com trinta segundos de parada sem resfriamento forçado, uma com sessenta segundos de parada sem resfriamento forçado, uma com trinta segundos de parada com resfriamento forçado e a última com uma com sessenta segundos de parada com resfriamento forçado. Foram medidas três alturas por parede, excluindo 20mm do início e do final, distantes 10mm uma da outra, utilizando o método de medição por varredura. A figura 34 apresenta uma das paredes sendo medida na máquina.

Figura 34 - Parede sendo medida



Fonte: elaboração própria

Após a medição foram extraídos os valores máximos de cada parede e realizada a média dos mesmos, que estão dispostos na tabela 14.

Tabela 14 - Tabela de alturas das paredes

Tempo de parada	Altura 1	Altura 2	Altura 3	Média
Sem parada	10,423	10,25	10,718	10,423
30s sem resfriamento forçado	11,329	11,321	11,339	11,329
60s sem resfriamento forçado	11,485	11,44	11,687	11,485
30s com resfriamento forçado	12,509	12,434	12,202	12,434
60s com resfriamento forçado	12,593	12,808	12,458	12,593

Fonte: elaboração própria

Com a análise das médias da tabela 14 apresentada é perceptível a melhoria na altura final da parede com tempo de parada entre camadas com resfriamento forçado, evidenciando ainda mais a presença do mesmo no processo de manufatura aditiva na soldagem.

4.8 Resultados com manufaturas de diferentes formatos de construção.

Após todos os testes e parametrizações realizados, foram confeccionadas duas caixas pelo método da manufatura aditiva, com o intuito de validar o processo para formas que não fossem em somente uma direção como o caso das paredes.

Foi realizada construção com estratégia quadrada com dez camadas, apresentada na figura 35. Essa construção possui paredes com 40mm de comprimento. O programa foi confeccionado no Teach Pendent do robô, assim como os apresentados anteriormente. É possível analisar a aparência do objeto, percebendo que as camadas ficaram bem definidas, sem aspectos de molhadas e sem apresentar porosidades. Foi utilizado o resfriamento forçado para a confecção dessa caixa e da com cinquenta camadas, porém, para um resfriamento mais uniforme é interessante que o bico de ar seja acoplado à tocha de soldagem, sendo o ar aplicado em toda a camada de forma mais igualitária.

Figura 35 - Construção com estratégia quadrada com 10 camadas



Fonte: elaboração própria

A outra construção confeccionada possui cinquenta camadas (figura 36). Nessa caixa, já é notada uma solda um pouco menos definida, devido à altura da caixa, evidenciando que o acoplamento do bico de ar na tocha se faz necessário para objetos com maior altura.

Figura 36 - Construção com estratégia quadrada com 50 camadas



Fonte: elaboração própria

5 CONCLUSÕES E SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS

5.1 Conclusões.

Os objetivos estipulados no início da pesquisa e desenvolvimento do projeto foram cumpridos com sucesso. A manufatura aditiva com MIG/MAG ainda não é muito difundida no mercado, pois existem outros tipos de processos com menor calor imposto a peça, porém, o processo MIG/MAG foi validado tanto para a construção de paredes como para a fabricação de caixas de diferentes tamanhos.

A adaptação de um sistema de resfriamento forçado mostrou-se necessária no decorrer do trabalho. A sua utilização reforçou a necessidade do mesmo,

apresentando paredes mais bem formadas quando foi utilizado, melhorando a relação de altura estipulada e altura criada.

A análise da temperatura se mostrou de grande valia para um melhor entendimento do comportamento térmico da manufatura aditiva, e também colaborou com a validação do resfriamento forçado como meio para a melhoria do processo de produção.

Com o trabalho realizado, foi dada entrada em um processo de busca de anterioridade para um potencial pedido de patente para o sistema de refrigeração forçada via ar comprimido para manufatura aditiva por deposição metálica. A busca de anterioridade será realizada pelo Núcleo de Inovação Tecnológica (NIT) do IFSC, através do edital N°36/2018/PROPPI.

5.2 Sugestões para trabalhos futuros.

Como perspectiva para trabalhos futuros, tem-se:

- a) Utilização do modo CCC (curto circuito controlado) na fonte para uma maior estabilidade nos curtos circuitos, podendo ser diminuída ainda mais a corrente utilizada.
- b) Adaptação de um bico de ar no eixo do robô, permitindo que o resfriamento seja feito diretamente sobre cada camada, havendo um resfriamento mais homogêneo.
- c) Adaptação de um sistema de controle, para que a altura do incremento do eixo Z do robô fosse dada de acordo com a altura da parede que está sendo construída.
- d) Criação de um sistema de resfriamento forçado por nível de água, para uma melhor refrigeração do sistema.
- e) Realização de testes em manufaturas com formas mais complexas, utilizando programação off-line para a criação dos programas.
- f) Utilização de diferentes tipos de arame dependendo da aplicação requerida, para análise dos parâmetros já utilizados.

6 BIBLIOGRAFIA

1. 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>.
2. 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>.
3. ESAB, Apostila de soldagem MIG/MAG. 2005.
4. MARQUES, P.V.; MODENESE, P.J.; BRACARENSE, A.Q. Soldagem: fundamentos e tecnologia. 3. ed. Belo Horizonte: UFMG, 2009.
5. IMC, Manual de Instruções DIGIPLUS A7. 8.ed, 2015.
6. DING, Donghong et al. A multi-bead overlapping model for robotic wire and arc additive manufacturing (WAAM). **Robotics And Computer-integrated Manufacturing**, [s.l.], v. 31, p.101-110, fev. 2015. Elsevier BV. <http://dx.doi.org/10.1016/j.rcim.2014.08.008>.
7. YANG, Dongqing; WANG, Gang; ZHANG, Guangjun. Thermal analysis for single-pass multi-layer GMAW based additive manufacturing using infrared thermography. **Journal Of Materials Processing Technology**, [s.l.], v. 244, p.215-224, jun. 2017. Elsevier BV. <http://dx.doi.org/10.1016/j.jmatprotec.2017.01.024>.
8. DING, Donghong et al. A practical path planning methodology for wire and arc additive manufacturing of thin-walled structures. **Robotics And Computer-integrated Manufacturing**, [s.l.], v. 34, p.8-19, ago. 2015. Elsevier BV. <http://dx.doi.org/10.1016/j.rcim.2015.01.003>.
9. DING, Donghong et al. Wire-feed additive manufacturing of metal components: technologies, developments and future interests. **The International Journal Of Advanced Manufacturing Technology**, [s.l.], v. 81, n. 1-4, p.465-481, 9 maio 2015. Springer Nature. <http://dx.doi.org/10.1007/s00170-015-7077-3>.
10. RODRIGUEZ, N. et al. Wire and arc additive manufacturing: a comparison between CMT and TopTIG processes applied to stainless steel. **Welding In The World**, [s.l.], v. 62, n. 5, p.1083-1096, 25 maio 2018. Springer Nature America, Inc. <http://dx.doi.org/10.1007/s40194-018-0606-6>

11. TEICHMANN, W. E. Análise de variantes de processos de soldagem visando o revestimento com INCONEL 625 de tubos de aço API X46. Dissertação (Doutorado em Engenharia Mecânica) – Universidade Federal de Santa Catarina (2016).
12. Programa de Pós-graduação *Stricto Sensu* em Mecatrônica. **Diretrizes de Estruturação do Documento de Projeto de Dissertação de Mestrado – PDM**, 2010. Página de internet: <http://mecatronica.florianopolis.ifsc.edu.br/ppgm/>, em Inscrições e Informes, Formulários.
13. SCOTTI, A.; PONOMAREV, V. **Soldagem MIG/MAG: melhor entendimento, melhor desempenho**. São Paulo: Artliber Editora, 2008.
14. GOHR, J.R, **Catálogo programação da fonte de soldagem IMC DIGIPLUS A7**, 2012.
15. 李金倮陈国富. **Forced air cooling welding set**. CN nº CN207326132U, 28 set. 2017, 08 maio 2018.
16. 蒋晓明; 刘晓光; 曹力超. **Additive manufacturing method and additive manufacturing device for aluminum alloy based on laser-double-MIG composite heat source**. CN nº CN106392348A, 02 dez. 2016, 15 fev. 2017.
17. Joseph B.. **Water vapor cooled nozzle used in the MIG and TIG arc welding process**. US nº US6586708B1, 04 set. 2001, 01 jul. 2003.
18. LINDE, Ficha de Informações de Segurança de Produtos Químicos (FISPQ). 2012.
19. LINDE, Catálogo de Gases de Proteção (Produtos e Processos), 2016.
20. Bosch, Datasheet: BMA 220 Digital, triaxial accelertaion sensor. Eletronic Publication, 2011.

APÊNDICE A – PROGRAMA DO ROBÔ EM ZIG

1: R[15:COMPRIMENTO mm]=100 ;
2: R[1]=1 ;
3: R[25]=15 ;
4: R[4]=1.5 ;
5: R[14:OFF_SET mm]=1.5 ;
6:L P[1] 80mm/sec FINE ;
7:L P[3] 80mm/sec FINE ;
8: WAIT .50(sec) ;
9: LBL[1] ;
10: PR[4]=P[3] ;
11: PR[4,3]=PR[4,3]+R[14:OFF_SET mm] ;
12: WAIT 2.00(sec) ;
13:L PR[4] 40cm/min CNT100 ;
14: PR[4,2]=PR[4,2]+R[15:COMPRIMENTO mm] ;
15: DO[10]=ON ;
16: WAIT 2.00(sec) ;
17:L PR[4] 60cm/min CNT100 ;
18: DO[10]=OFF ;
19: WAIT 2.00(sec) ;
20: PR[4,3]=PR[4,3]+R[14:OFF_SET mm] ;
21:L PR[4] 40cm/min CNT100 ;

22: WAIT 2.00(sec) ;

23: PR[4,2]=PR[4,2]-R[15:COMPRIMENTO cm/min] ;

24:L PR[4] 60cm/min CNT100 ;

25: WAIT 5.00(sec) ;

26: R[14:OFF_SET mm]=R[14:OFF_SET mm]+R[4] ;

27: WAIT 1.00(sec) ;

28: IF R[14:OFF_SET mm]<=R[25],JMP LBL[1] ;

29: WAIT .50(sec) ;

30: DO[10]=OFF ;

31:L P[4] 80mm/sec FINE ;

APÊNDICE B – PROGRAMA DO ROBÔ EM ZIG-ZAG

1: R[15:COMPRIMENTO mm]=100 ;

2: R[1]=1 ;

3: R[25]=15 ;

4: R[4]=1.5 ;

5: R[14:OFF_SET mm]=1.5 ;

6:L P[1] 80mm/sec FINE ;

7:L P[3] 80mm/sec FINE ;

8: WAIT .50(sec) ;

9: LBL[1] ;

10: PR[4]=P[3] ;

11: PR[4,3]=PR[4,3]+R[14:OFF_SET mm] ;

12: WAIT 2.00(sec) ;

13:L PR[4] 40cm/min CNT100 ;

14: PR[4,2]=PR[4,2]+R[15:COMPRIMENTO mm] ;

15: DO[10]=ON ;

16: WAIT 2.00(sec) ;

17:L PR[4] 60cm/min CNT100 ;

18: DO[10]=OFF ;

19: WAIT 20.00(sec) ;

20: PR[4,3]=PR[4,3]+1.5 ;

21:L PR[4] 40cm/min CNT100 ;

22: PR[4,2]=PR[4,2]-R[15:COMPRIMENTO mm] ;

23: DO[10]=ON ;

24: WAIT 2.00(sec) ;

25:L PR[4] 60cm/min CNT100 ;

26: DO[10]=OFF ;

27: WAIT 20.00(sec) ;

28: R[14:OFF_SET mm]=R[14:OFF_SET mm]+R[4]+R[4] ;

29: WAIT 1.00(sec) ;

30: IF R[14:OFF_SET mm]<=R[25],JMP LBL[1] ;

31: WAIT .50(sec) ;

32: DO[10]=OFF ;

33:L P[4] 80mm/sec FINE ;