

**UNIVERSIDADE FEDERAL DE SANTA CATARINA
CENTRO TECNOLÓGICO
DEPARTAMENTO DE AUTOMAÇÃO E SISTEMAS**

Fernando Lucas dos Santos e Silva

**Desenvolvimento de Estratégias para
Manufatura Aditiva via Soldagem a Arco**

Florianópolis

2017

Fernando Lucas dos Santos e Silva

**Desenvolvimento de Estratégias para
Manufatura Aditiva via Soldagem a Arco**

Relatório submetido à Universidade Federal de Santa Catarina como requisito para a aprovação na disciplina **DAS 5511: Projeto de Fim de Curso** do curso de Graduação em Engenharia de Controle e Automação.

Orientador: Prof. Régis Henrique Gonçalves e Silva, Dr. Eng.

Florianópolis

2017

Fernando Lucas dos Santos e Silva

Desenvolvimento de Estratégias para Manufatura Aditiva via Soldagem a Arco

Esta monografia foi julgada no contexto da disciplina DAS5511: Projeto de Fim de Curso e aprovada na sua forma final pelo Curso de Engenharia de Controle e Automação.

Florianópolis, _____ de _____ de _____

Banca Examinadora:

Prof. Régis Henrique Gonçalves e Silva, Dr. Eng.
Orientador no Curso
LABSOLDA – Instituto de Soldagem e Mecatrônica

Prof. Victor de Negri, Dr. Eng.
Avaliador
Universidade Federal de Santa Catarina

Rodrigo Schmitt Meurer
Debatedor
Universidade Federal de Santa Catarina

Andjara Consentino
Debatedora
Universidade Federal de Santa Catarina

“Imprensa é um exército de 26 soldados de chumbo
com o qual se pode conquistar o mundo.”

— Johannes Gutenberg, aperfeiçoador da prensa móvel que revolucionou o
processo de produção de livros e permitiu a circulação de ideias
e conhecimentos de forma mais rápida e eficiente.

RESUMO

Manufatura Aditiva (MA) ou Impressão 3D são termos cada vez mais encontrados devido à 4ª Revolução Industrial pela qual estamos passando. Existem inúmeras aplicações para as peças de polímero produzidas pelas impressoras que hoje são vendidas comercialmente como, por exemplo, Modelagem Conceitual, Protótipos Funcionais e até para Uso Final. Se por um lado a MA de polímeros já está bem estabelecida, a MA utilizando metais ainda está nas esferas das Universidades e começando a migrar para a Indústria. Dentre os diversos processos existentes para a MA de peças metálicas está a Manufatura Aditiva via Soldagem a Arco com Adição de Arame, ou seja, imprimir uma peça metálica utilizando equipamentos de soldagem. O LABSOLDA é um laboratório com mais de 43 anos de experiência em soldagem de união e revestimento. Para que pesquisas em MA de peças metálicas se tornassem possíveis no laboratório alguns desenvolvimentos eram necessários como, por exemplo, formas eficientes de geração de trajetórias, dispositivos para melhorar a dissipação de calor do processo e sistemas de controle da distância entre a tocha e a peça que está sendo manufaturada. Este projeto entra no contexto de criar condições mínimas para que pesquisas em Manufatura Aditiva comecem a ser realizadas no laboratório.

Palavras-chave: Manufatura Aditiva de Peças Metálicas via Soldagem a Arco com Adição de Arame. WAAM. Impressão 3D. Geração de Trajetórias. Dissipação de Calor. Sensoriamento a Laser. Manufatura Avançada. Indústria 4.0.

ABSTRACT

The terms Additive Manufacturing (AM) or 3D Printing are increasingly found terms due the Fourth Industrial Revolution we are going through. There already are numerous applications for the polymer parts produced by printers that are now commercially sold, such as Conceptual Modeling, Functional Prototypes and even End-Use. If on one hand the Polymer AM is already well established, Metal AM is still in the spheres of the Universities starting to migrate to industrial fields. Wire-Arc Additive Manufacturing (WAAM) is among several existing processes for the AM of metallic parts, that is, to print metal parts using welding equipment. LABSOLDA is a 43 years old experienced lab in the field of overlay and union welding. Some developments were necessary in order for AM research on metal parts to become possible in the laboratory such as the creation of efficient toolpath generators, devices to improve process heat dissipation and systems to control the distance between the torch and the part being manufactured. This project goes into the context of creating minimum conditions for research in Additive Manufacturing to begin in the laboratory.

Key-words: Wire-Arc Additive Manufacturing. WAAM. Metal 3D Printing. Toolpath Generators. Heat Dissipation. Laser Sensing. Advanced Manufacturing. Industry 4.0.

SUMÁRIO

1	Introdução	8
1.1	Impressão 3D x Manufatura Aditiva	9
1.2	Manufatura Aditiva de Peças Metálicas	11
1.2.1	Processos de Manufatura Aditiva de Peças Metálicas	12
1.2.1.1	Sistemas com Leito de Pó	12
1.2.1.2	Sistemas com Alimentação de Pó	16
1.2.1.3	Sistemas com Alimentação de Arame	20
1.3	Soldagem a Arco	26
1.3.1	Soldagem	26
1.3.2	Soldagem MIG	28
1.3.3	Processo CMT - Fronius	28
1.3.3.1	Processo CMT Advanced	30
1.4	Desafios na Manufatura Aditiva via Soldagem a Arco	31
1.4.1	Parâmetros Elétricos	32
1.4.2	Geração de Trajetórias	33
1.4.3	Dissipação de Calor	35
1.4.4	Estimativa da Altura dos Cordões	36
1.5	Objetivos	37
1.5.1	Objetivos Específicos	38
2	Desenvolvimento	39
2.1	Escolha do Processo de Soldagem e Definição dos Parâmetros	39
2.2	Geração de Trajetórias	45
2.2.1	Manipulador Antropomórfico HP20D	45
2.2.1.1	Linguagem INFORM III	47
2.2.1.1.1	Variáveis de Usuário	48
2.2.1.1.1.1	Variáveis de Posição	49
2.2.1.1.2	Programas .JBI	51
2.2.2	Compiladores de Trajetórias	52
2.2.2.1	Compilador de Trajetórias Interativo	52
2.2.2.2	Compilador de Trajetórias Baseado em Arquivos CAD	57
2.2.2.2.1	Software CAD – Solidworks	57

2.2.2.2.1.1 Decomposição do Modelo CAD em Pontos.....	58
2.2.2.2.1.2 Projeção de Pontos em Contornos Seleccionadas.....	61
2.3 Dissipação de Calor	65
2.3.1 Primeiro Dispositivo de Refrigeração	68
2.3.2 Segundo Dispositivo de Refrigeração	70
2.4 Estimativa das Alturas dos Cordões	74
2.4.1 Sensor Laser Meta Vision Systems.....	77
2.4.2 Desenvolvimento de Interface Dedicada	78
2.4.3 Determinação da Faixa de Medição	79
2.4.4 Tratamento dos Dados	82
2.4.5 Calibração do Zero e Levantamento da Reta de Tendência	84
2.4.6 Ensaio para Validação do Sistema de Controle	87
3 Resultados.....	91
4 Considerações Finais e Perspectivas.....	94
REFERÊNCIAS	96

1 INTRODUÇÃO

Manufatura significa obra feita a mão. A palavra é oriunda da língua latina e é produto da junção das palavras MANUS, “mão”, e FACTURA, que é conjugação do verbo “fazer”. É entendida como o processo de conversão de matérias-primas, componentes ou peças em produtos acabados que atendam às expectativas ou especificações de um cliente. Sucedeu o artesanato, no século XV, como forma de produção e organização de trabalho.

Com o início da Revolução Industrial, no final do século XIX, a *Manufatura* passou a ser um sistema de produção de grande quantidade de itens, com produção em série, padronizada, exigindo a divisão social do trabalho e utilizando, necessariamente, a mão de obra humana para a produtividade. Mas, ao decorrer do tempo, o termo passou a ser utilizado não somente para o resultado de produtos feitos a mão como também para produtos fabricados com o uso de maquinário, tendo ou não a participação direta de mão de obra humana.

No entanto, entende-se, ainda, que *Manufatura* seja o designativo de um estabelecimento fabril onde o trabalho esteja sendo feito por grande número de pessoas, cada uma responsável por um produto ou por uma parte do processo industrial – é a atual designação de *fábrica* ou *indústria*.

Por fim, a expressão “*produto manufaturado*” acaba sendo utilizada para referenciar qualquer bem produzido por uma indústria.

Na literatura, podem ser encontrados outros termos relacionados a palavra *Manufatura*, como, por exemplo, *Manufatura Enxuta*, que se refere a uma filosofia operacional criada na fábrica da Toyota, no Japão, após a II Guerra Mundial, e possui objetivos de eliminar desperdícios da produção mantendo estoques baixos e reduzindo o número de quebras ou falhas.

Manufatura Reversa e *Maquinofatura* são outros termos relacionados a *manufatura* que podem ser encontrados.

O primeiro se refere a inovação tecnológica que visa recuperar o lixo eletrônico com o objetivo de reciclar e, assim, preservar o meio ambiente dialogando com a sustentabilidade. Já o segundo, *Maquinofatura*, é o nome dado a indústria mecanizada, ou seja, que utiliza máquinas e robôs e se demonstra como uma espécie de evolução da

Manufatura. Seu início ocorreu na **Primeira Revolução Industrial** com a criação das primeiras máquinas a vapor e possibilitou a realização de operações que não dependiam da força animal, humana, dos ventos e nem das águas – esse foi o começo da manufatura moderna.

Na **Segunda Revolução Industrial** havia outras fontes de energia, como o petróleo, a água e o urânio. Já na **Terceira Revolução Industrial**, a partir de 1970, houve o desenvolvimento da eletrônica e o conseqüente surgimento da informática, o que possibilitou uma nova fase nas manufaturas, uma maior especialização das máquinas e a diminuição de erros mecânicos.

O mundo está, agora, entrando na **Quarta Revolução Industrial**. Estamos em uma época na qual as novas tecnologias estão permitindo que os mundos físico, digital e biológico se fundam e, assim, sustentam motivos para definir que este processo é uma nova revolução industrial e não somente uma prolongação da última. Entre os motivos, podemos citar a velocidade dos avanços atuais que tem aumentado de forma exponencial e não linear, como nas revoluções industriais anteriores.

Esse novo fenômeno vem remodelando indústrias nos países em tamanha amplitude que uma transformação de sistemas inteiros de produção, gestão e governança está sendo anunciada. A indústria desta revolução industrial vem sendo chamada de **Indústria 4.0**, onde produtos poderão encontrar seus próprios caminhos dentro da linha de produção graças ao nível de integração proporcionado pela *Internet das Coisas*.

Cada vez mais pessoas estão conectadas por dispositivos móveis com capacidade de processamento, armazenagem e acesso ao conhecimento nunca antes imagináveis. Essas possibilidades serão multiplicadas por avanços em campos como Inteligência Artificial, Robótica, Internet das Coisas, Veículos Autônomos, Nanotecnologia, Computação Quântica, Biotecnologia, Ciência dos Materiais, Armazenamento de Energia e, por último, mas não menos importante, **Impressão 3D** e/ou **Manufatura Aditiva**.

1.1 Impressão 3D x Manufatura Aditiva

Na literatura, muito se encontra tanto sobre **Manufatura Aditiva** quanto sobre **Impressão 3D**. Estes são termos cada vez mais encontrados nos meios de comunicação devido a nova revolução industrial pela qual estamos passando. Porém, pouco é feito para indicar a, se é que existe alguma, diferença entre eles.

Primeiramente, é necessário reconhecer que ambos termos se relacionam a uma mesma tecnologia na qual definições sobre a peça são levadas em consideração para que material seja depositado conforme o processo escolhido. Em praticamente todos os casos as peças são construídas pela adição de camadas de material uma sobre a outra e é exatamente esta característica que o diferencia de outras tecnologias.

As coisas pareciam mais fáceis na década de 1980 quando essa tecnologia era utilizada quase que exclusivamente para **Prototipagem Rápida**, que se baseava na criação de protótipos iniciais de modelos de produtos. Por mais de 20 anos, esta foi uma tecnologia utilizada basicamente para imitar os resultados dos métodos mais tradicionais de manufatura, como usinagem, fundição, moldagem por injeção, conformação mecânica, entre outros.

Começaram a perceber que poderiam utilizar a mesma tecnologia para produzir componentes de uso final e o termo **Manufatura Rápida** começou a vir à tona no meio industrial, mesmo que esta não seja necessariamente uma manufatura tão rápida assim.

Por muito tempo os termos utilizados se resumiram em *Prototipagem Rápida* e *Manufatura Rápida*. Mas esses termos representavam duas possibilidades de aplicação de uma tecnologia e se tornaram insuficientes durante a explosão nas variedades de impressoras comerciais que ocorreu devido a expiração de patentes. Os principais meios de comunicação precisavam de um termo melhor e foi aí que nasceu o termo **Impressão 3D**.

O termo **Impressão 3D** se espalhou rapidamente e pegou, na verdade, por ser extremamente descritivo e por aproveitar o conceito de impressora que já era um conceito muito difundido entre as pessoas. Os termos *Manufatura Aditiva*, *Prototipagem Rápida* e *Manufatura Rápida* não fazem muito sentido para pessoas que não pertencem ao campo da Engenharia. Já o termo *Impressão 3D* faz sentido para praticamente qualquer um.

Por outro lado, aqueles que trabalhavam nos nichos mais avançados do mercado utilizando máquinas avançadas de sinterização ou de fusão não gostariam de ter suas soluções confundidas com impressoras comuns. Este é um nicho que vem fazendo pressão para que suas máquinas e soluções sejam adotadas como alternativa aos processos tradicionais de usinagem e moldagem por injeção. Nessa área o termo *Manufatura Aditiva* é o preferido.

Essencialmente, **Impressão 3D** e **Manufatura Aditiva** são a mesma coisa. Ambas representam a técnica de fabricação baseada em camadas. Mas a escolha de um termo

em detrimento ao outro depende do contexto em que a situação se insere – a peça obtida é para parecer legal e ficar sobre uma mesa como enfeite ou possui um propósito industrial substituindo outros processos de fabricação na busca de eficiência e sustentabilidade?

1.2 Manufatura Aditiva de Peças Metálicas

A Manufatura Aditiva de peças metálicas permite a obtenção de objetos complexos que seriam caros, quando não impossíveis, de se produzir através dos processos de fabricação mais tradicionais. Muitas aplicações vêm sendo desenvolvidas pelos últimos anos e indústrias como a aeroespacial, a automotiva e a médica estão se beneficiando diretamente destes avanços.

Primeiramente, Manufatura Aditiva pode reduzir a relação *buy-to-fly* consideravelmente, que é a razão entre a quantidade total de material utilizado e a quantidade de material na peça finalizada. Nos processos convencionais de manufatura, a relação *buy-to-fly* para motores e estrutura de aviões podem chegar a 10:1 e 20:1, respectivamente. Já com a Manufatura Aditiva é possível produzir peças muito próximas a suas geometrias finais e a relação *buy-to-fly* pode chegar a 1:1 [8].

O crescimento da indústria de Manufatura Aditiva está prevista por muitos a ser rápida e substancial conforme mais empresas desenvolvem novos equipamentos, mais materiais se tornam disponíveis e mais usuários finais adotam a tecnologia. O valor global desta indústria está estimado em atingir 10 bilhões de Dólares em 2021 [3].

A Manufatura Aditiva de Peças Metálicas tem se demonstrado uma ótima ferramenta para designers industriais que finalmente ganharão a possibilidade de fabricar no mundo real componentes com geometrias otimizadas, obtidas com ajuda de softwares de simulação, que até então ficavam limitadas ao mundo virtual. Este é o conceito de **Design Generativo**, na qual uma abordagem similar a evolução encontrada na natureza é adotada.

No **Design Generativo**, os designers ou engenheiros definem as especificações que o produto deve respeitar juntamente com os materiais utilizados, custo máximo, entre outras restrições. O software, então, utilizando simulações baseadas em Inteligência Artificial e Computação em Nuvem, evolui uma solução inicial para encontrar a melhor, ou a mais próxima da melhor, solução possível.

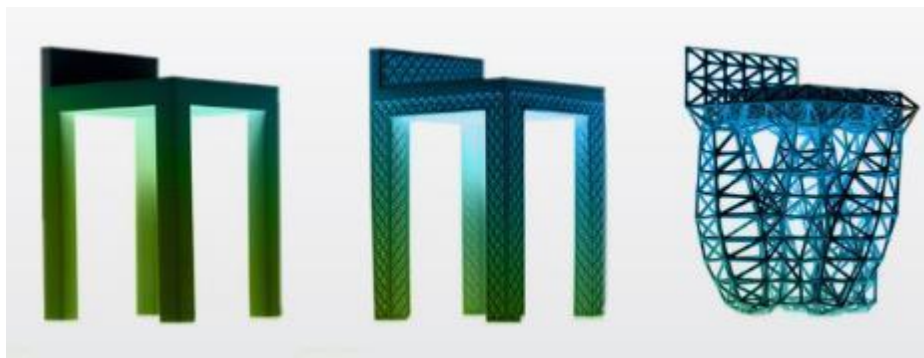


Figura 1: Exemplo de Design Generativo fornecido pela empresa Autodesk [4]

Geralmente, o resultado obtido possui formas impossíveis de serem fabricadas pelos métodos mais tradicionais de manufatura - é nesse sentido que a Manufatura Aditiva entra com grande potencial.

Porém, é irreal pensar que todos os processos de fabricação atuais serão substituídos por Manufatura Aditiva. A ideia de que uma única máquina será capaz de produzir qualquer geometria com ilimitada variação de material se torna muito improvável ao considerar que somente dentro do campo da própria Manufatura Aditiva de Peças Metálicas já existem inúmeros processos entre os quais a escolha do mais adequado depende da peça que se deseja obter.

1.2.1 Processos de Manufatura Aditiva de Peças Metálicas

Os diferentes processos para manufatura aditiva de peças metálicas podem ser divididos em três grandes grupos: **Sistemas com Leito de Pó**, **Sistemas com Alimentação de Pó** e **Sistemas com Alimentação de Arame**.

1.2.1.1 Sistemas com Leito de Pó

Neste processo, um leito, ou cama, de pó é criado ao se espalhar uma quantidade considerável deste sobre a área de trabalho do sistema por um mecanismo que é habitualmente automatizado.

A fonte de energia, que pode ser tanto um feixe de elétrons (*electron beam*) quanto um feixe laser, é programada para bombardear a superfície do leito de tal maneira que a fusão ou a sinterização do pó ocorra somente na geometria desejada. O processo necessita ocorrer no vácuo quando feixe de elétrons é utilizado como fonte de energia.

Em seguida, o sistema decrementa a altura da área de trabalho e mais metal em pó é espalhado sobre o leito. O processo é repetido até que uma peça sólida de três dimensões seja formada. Uma ilustração do sistema é exibida na Figura 2.

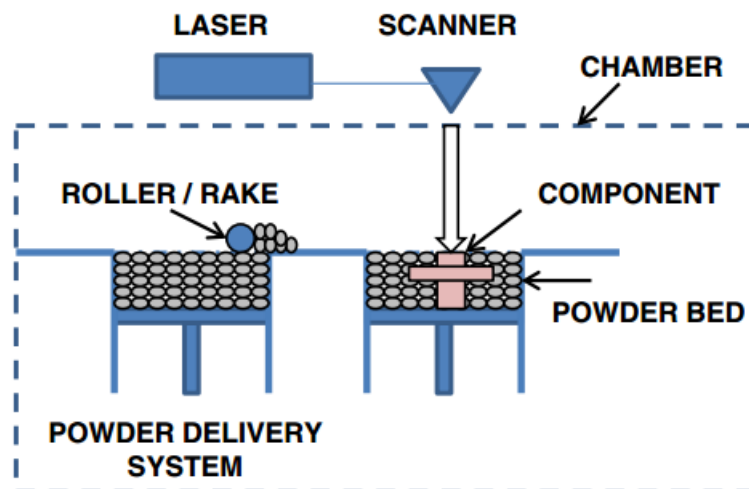


Figura 2: Sistema de Manufatura Aditiva com Leito de Pó. Fonte: [6]

Entre as vantagens deste processo está a habilidade de produzir peças com muitos detalhes e passagens internas devido à grande capacidade de controle dimensional, mas, por outro lado, as peças produzidas possuem pequeno volume – menos do que 0.03m^3 [6].

- Direct Metal Laser Sintering (DMLS)

O processo *Direct Metal Laser Sintering (DMLS)* sinteriza metal e ligas metálicas em pó usando um laser de alta potência para produzir peças metálicas robustas. Esta tecnologia produz peças metálicas prontas, incluindo ferramentas e peças de produção para diversos setores da indústria.

A câmara da área de trabalho possui um controle que mantém a temperatura da peça usualmente apenas alguns graus abaixo do ponto de fusão do material, exigindo

menos potência do laser para que uma nova camada seja sinterizada a peça. Muitas vezes a câmara é preenchida com nitrogênio para maximizar a oxidação e melhorar o acabamento final da peça.

Neste processo, períodos de resfriamento são exigidos para que uma sinterização de qualidade seja atingida. Alguns equipamentos baseados em DMLS possuem capacidade de monitorar a temperatura camada por camada e adaptar a potência do laser com o intuito de otimizar a qualidade da peça final.

Uma peça manufacturada pelo processo DMLS é ilustrada na Figura 3.



Figura 3: Peça manufacturada utilizando o processo DMLS. Fonte: YouTube.

- Selective Laser Melting (SLM)

SLM utiliza laser para fundir camadas sucessivas de pó metálico. O sistema se baseia em arquivo CAD para fazer o laser bombardear partículas em locais específicos do leito com pó metálico até que haja uma fusão completa do material. Em seguida, o sistema sucessivamente espalha mais metal em pó sobre o leito, até que o objeto seja completamente manufacturado.

A principal diferença deste processo em relação ao DMLS está no nível ao que as partículas são aquecidas – enquanto no DMLS a temperatura atinge um nível

suficiente somente para a sinterização do pó, no SLM a temperatura chega até o ponto de fusão do material.

- Electron Beam Melting (EBM)

Neste processo, camadas são formadas utilizando um feixe de elétrons para fundir metal em pó. Os equipamentos da *Arcam*, empresa pioneira neste processo, utilizam bobinas eletromagnéticas para controlar o feixe de elétrons e uma pressão de vácuo na ordem de 1×10^{-5} mbar (EBM Arcam, 2014).

O processo EBM é capaz de manufaturar peças com boas propriedades físicas devido a uma distribuição uniforme da temperatura durante a fusão (Chua et al., 2010). A alta qualidade das peças produzidas por este processo o torna adequado para a manufatura de peças de alto padrão utilizadas em aplicações de indústrias como a aeroespacial e médica. Na Figura 4, é possível visualizar a área de trabalho coberta de metal em pó em seu leito e o feixe de elétrons sendo disparado de acordo com a geometria da peça a ser manufaturada.



Figura 4: Feixe de Elétrons disparado para fusão de metal em pó. Fonte: Youtube

Quando comparado ao processo de usinagem CNC, a utilização do EBM com titânio e camadas de 0.1mm de espessura fornece melhores resultados, de modo mais rápido e reduzindo os custos em até 35% [7]. Operações pós-impressão incluem a remoção do excesso de pó e usinagem CNC de acabamento.

1.2.1.2 Sistemas com Alimentação de Pó

Estes sistemas são capazes de produzir peças muito maiores do que as do sistema anterior, sendo possível obter peças com mais de 1.2m³ de volume. Nestes sistemas, um **Laser**, **Feixe de Elétrons** ou um **Arco Elétrico** é usado como fonte de energia e o metal em pó é transportado até a poça metálica através de um bico.

Existem dois tipos que predominam no mercado: um no qual a peça que está sendo manufatura é mantida estática e todo o cabeçote se move; e outro no qual o cabeçote se mantém estático e a peça se move. Uma ilustração do sistema é exibida na Figura 5.

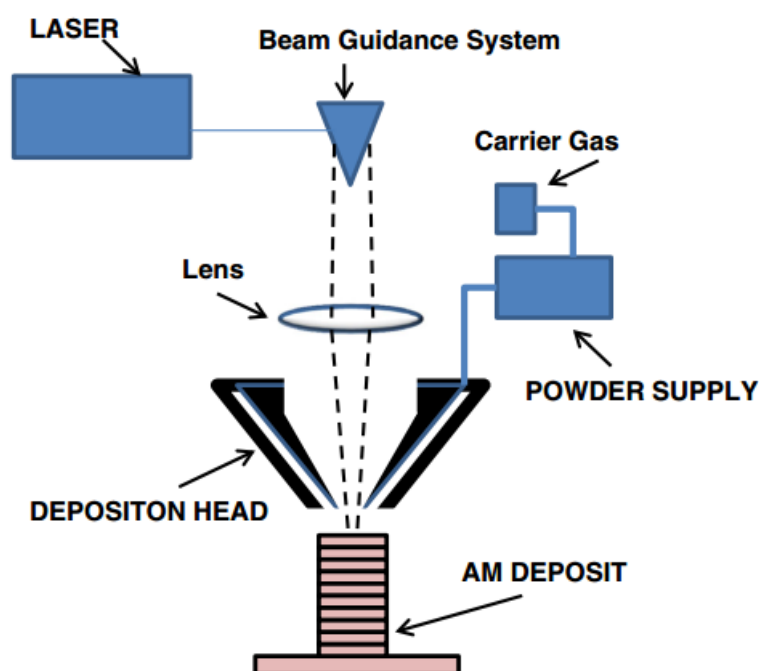


Figura 5: Sistema de Manufatura Aditiva com Alimentação de Pó. Fonte: [6]

- Laser Engineered Net Shape (LENS)

LENS é uma tecnologia desenvolvida pela *Sandia National Laboratories* que se baseia em modelos CAD não só para manufaturar peças metálicas aditivamente, mas também para modificar ou reparar peças já existentes como, por exemplo, pás lascadas de turbinas. Em [11], são demonstrados 4 (quatro) procedimentos de reparos: recuperação de uma garrafa metálica goivada, diminuição do diâmetro interno das bases de uma bancada,

aumento do diâmetro externo de luvas de conexão e o reparo de grampos utilizados para a fixação de corpos de prova.

Além da utilização das ligas mais tradicionais como aço inoxidável, aço ferramenta, titânio e as baseadas em níquel, materiais compósitos também já foram utilizados com este processo. Por fim, peças que possuem variações de composição ao longo de suas geometrias também podem ser obtidas com este processo. A manufatura de uma lâmina genérica utilizando este processo é ilustrada na Figura 6.

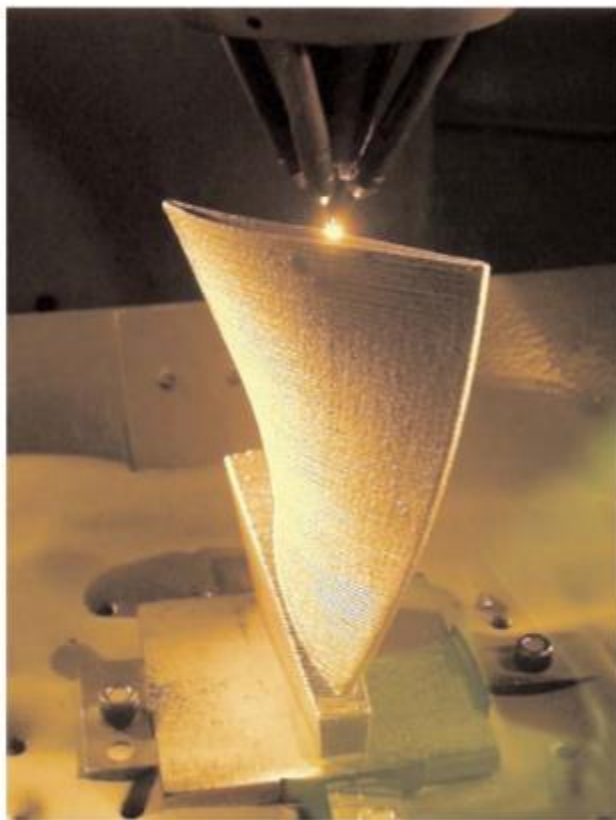


Figura 6: Manufatura de uma lâmina utilizando LENS. Fonte: [12]

- Laser Metal Deposition-powder (LMD-p)

LMD é um processo que foi desenvolvido pela empresa inglesa de pesquisa e desenvolvimento chamada *TWI* para o projeto europeu *MERLIN*. Este projeto visa reduzir o impacto ambiental do transporte aéreo utilizando técnicas de Manufatura Aditiva na produção de aeronaves comerciais. A ideia é atingir aproveitamento de quase 100% de material, sem o uso de produtos químicos e sem custos de ferramentas na fabricação dos componentes destas aeronaves reduzindo drasticamente o custo de fabricação. Além disto,

a Manufatura Aditiva permitirá que aviões se tornem mais leves com a utilização de menos material na confecção de seus componentes e com isso gerará uma enorme economia de combustível e grande diminuição na quantidade de gases tóxicos emitidos [13].

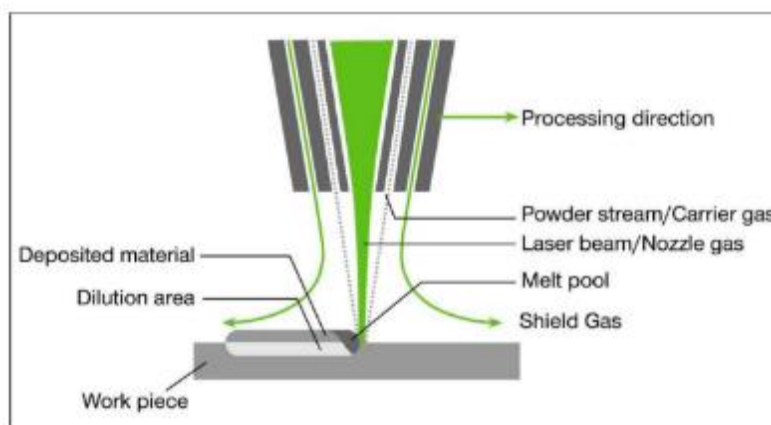


Figura 7: LMD-p direciona um fluxo concentrado de pó para dentro da poça de fusão. Fonte: metal-powder.net

- Plasma Transferred Arc-powder (PTA-p)

Aplicações em Manufatura Aditiva que utilizam **arco elétrico** como fonte de calor estão se tornando cada vez mais comuns. Muito disto é devido à alta produtividade atingida por estes processos quando comparados com processos baseados em feixe laser.

O processo PTA permite um melhor controle da taxa de alimentação de material de adição e possui um menor aporte térmico quando comparado a outros processos de soldagem baseados em arco elétrico, como o MIG e o TIG convencionais. Estas características o torna adequado para aplicações de Manufatura Aditiva principalmente na fabricação de peças mais nobres. Se as vantagens do PTA poderem ser estendidas a fabricação de peças finas e pequenas este processo será muito competitivo quando comparado a processos de Manufatura Aditiva baseados em laser [14].

As Figuras 8, 9 e 10 exibem os três modelos básicos de tochas PTA-p que se diferenciam entre si pela forma de alimentação de pó. É importante ressaltar que o modelo com *alimentação central* acaba se limitando a teoria devido à enorme dificuldade de usinar um furo passante por todo o comprimento de um eletrodo.

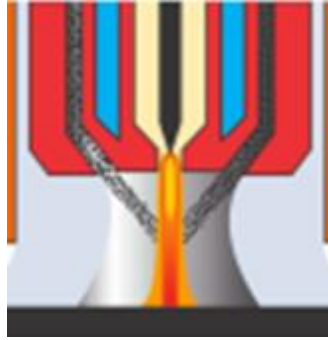


Figura 8: Tocha PTA com injeção externa de pó. Fonte: [14]

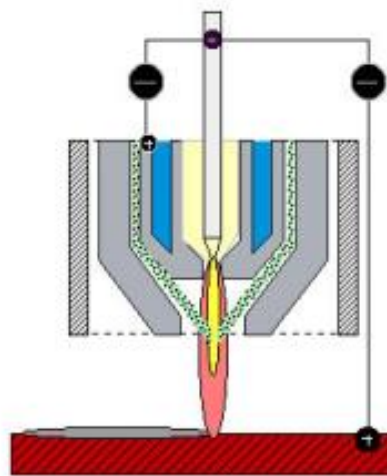


Figura 9: Tocha PTA com injeção interna de pó. Fonte: [15]

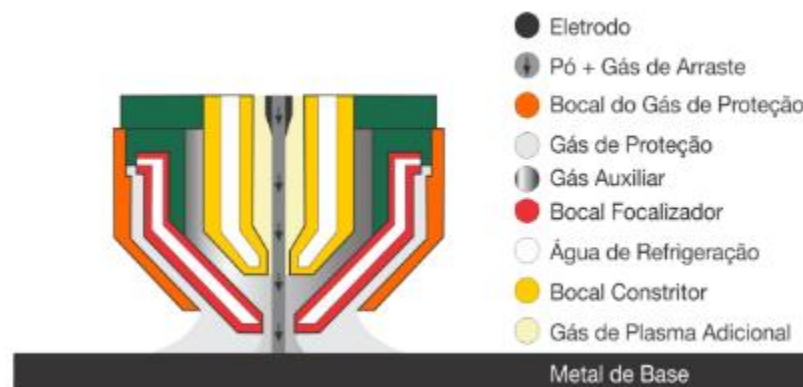


Figura 10: Tocha PTA com injeção central de pó. Fonte: [16]

Resultados obtidos em [14] demonstram que paredes finas (2mm) podem, sim, ser manufaturadas utilizando PTA-p e indicam que a espessura efetiva destas paredes depende principalmente da composição da liga utilizada. Estes resultados complementam

os de outros artigos encontrados na literatura [17] nos quais paredes mais espessas (16mm) são obtidas demonstrando que este processo pode ser utilizado para a manufatura de uma vasta gama de geometrias.

Existem, ainda, muitas questões em aberto em relação a utilização do PTA-p para Manufatura Aditiva como, por exemplo, o aparente menor desperdício de pó quando comparado a processos Laser-p e as vantagens e desvantagens em utilizar tochas com alimentação interna em relação a tochas com alimentação externa de pó.

1.2.1.3 Sistemas com Alimentação de Arame

Nestes sistemas de Manufatura Aditiva o material é adicionado em forma de arame e a fonte de energia pode ser por **feixe laser**, **feixe de elétrons** ou **arco voltaico**.

Inicialmente, uma camada simples de material é depositada e, subsequentemente, outras camadas são depositadas, uma após a outra, de acordo com a geometria da peça desejada. Uma ilustração do sistema é exibida na Figura 11.

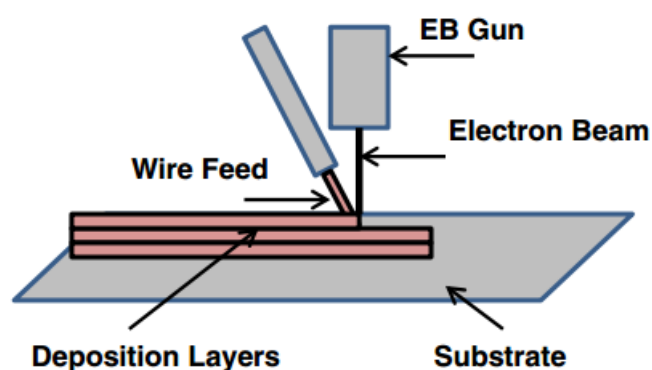


Figura 11: Sistema de Manufatura Aditiva com Alimentação de Arame. Fonte: [6]

Em geral, sistemas com alimentação de arame são indicados na busca de altas taxas de deposição e na construção de peças de grandes volumes. Entretanto, peças manufaturadas por este processo geralmente necessitam receber um trabalho de usinagem de acabamento mais extensivo quando comparadas com peças obtidas com sistemas que utilizam material de adição em pó.

Baseando-se em pesquisas na internet, a utilização de material de adição em forma de pó é mais cara do que a utilização do mesmo tipo de material em forma de arame. Por exemplo, em média, Titânio 6Al-4V em pó é por volta de 141% mais caro do que o custo médio da mesma liga em arame – e o titânio em arame geralmente tem um tempo de entrega menor do que titânio em pó. Tântalo em pó é 7% mais caro do que a média do preço do Tântalo em arame. E, por fim, ligas de Inconel 625 e de Aço Inox 316 são duas vezes mais caras quando fornecidas em pó do que quando fornecidas em forma de arame [9]. Uma comparação entre os preços de algumas ligas em diferentes formas é exibida na Figura 12.

Material Feedstock	Titanium 6Al-4V	Tantalum	Inconel 625	Stainless Steel 316
Wire—0.035" Diameter (0.9 mm)	\$58/lb.	\$515.30/lb.	\$26.73/lb.	\$5.19/lb.
Wire—0.045" Diameter (1.1 mm)	\$54/lb.	\$545.30/lb.	\$23.30/lb.	\$4.63/lb.
Wire—0.062" Diameter (1.6 mm)	\$50/lb.	\$524.88/lb.	\$22.17/lb.	\$4.57/lb.
Wire—0.093" Diameter (2.4 mm)	\$48/lb.	\$502.30/lb.	\$21.43/lb.	\$4.81/lb.
Wire—0.125" Diameter (3.2 mm)	\$45/lb.	\$438.96/lb.	\$21.02/lb.	\$4.75/lb.
Wire—0.156" Diameter (4.0 mm)	\$44/lb.	\$438.96/lb.	N/A	\$4.69/lb.
Powder—AM Grade	\$120/lb.	\$522/lb.	\$48/lb.	\$10/lb.

Figura 12: Comparação de preços de algumas ligas. Fonte: US Comercial Market/Junho 2015.

Sistemas de Manufatura Aditiva com alimentação de arame também podem ser divididos em 3 grupos quando o tipo da fonte de emissão de energia é considerado: **Laser**, **Feixe de Elétrons** ou **Arco Elétrico**. Cada grupo possui vantagens e desvantagens. É possível encontrar, na literatura, análises detalhadas que os comparam entre si considerando materiais utilizáveis e eficiência.

- Electron Beam Freeform (EBF)

Um dos processos de Manufatura Aditiva mais interessantes é o *Electron Beam Freeform* patenteado pela NASA para construir peças complexas próximas as suas dimensões finais. Esse processo surgiu há quase 10 (dez) anos e é fruto da idealização de

uma máquina capaz de fabricar peças ou ferramentas assim que a necessidade surgir na Terra, Marte ou na Estação Espacial Internaciona .

A técnica utilizada pelo processo EBF consiste em adicionar material de adição em forma de arame à poça metálica em um ambiente de alto vácuo utilizando feixe de elétrons como fonte de energia para a fusão de material. Este processo atinge taxas de deposição de até 2500cm³/h e boa capacidade de manufaturar peças que possuem muitos detalhes. Em relação a esta capacidade de reproduzir detalhes, o tamanho destes é determinado pelo diâmetro do arame de alimentação onde menores diâmetros são capazes de reproduzir detalhes mais finos [10]. Uma peça manufaturada utilizando este processo é exibida na Figura 13.



Figura 13: Peça estrutural manufaturada com o processo EBF. Fonte: [18]

Devido a existência de dois alimentadores de arame que podem atuar de forma simultânea é possível misturar, durante a execução do processo, dois materiais distintos para se obter uma liga desejada ou para unir um material em outro.

Outro ponto destacado pela NASA é a questão da sustentabilidade ambiental dentro da qual é citado o exemplo onde, para a fabricação de um determinado componente de avião na forma tradicional, é necessário utilizar um bloco de titânio de 2700kg (dois mil e setecentos quilogramas) do qual, após a usinagem, obtém-se uma peça final com massa de apenas 150kg (cento e cinquenta quilogramas). Isto significa 2550kg (dois mil quinhentos e cinquenta quilogramas) de titânio para reciclagem e o uso de milhares de galões de fluido de corte. Com a utilização do EBF é possível obter o mesmo componente utilizando apenas 170kg (cento e setenta quilogramas) de titânio dos quais somente 20kg (vinte quilogramas) é usinado. Como se estas já não fossem vantagens suficientes, uma menor quantidade de energia elétrica é requerida para a obtenção do componente em questão [18].

- Electron Beam Additive Manufacturing (EBAM)

A empresa *Sciaky Inc.* começou a desenvolver o processo baseado em feixe de elétrons e arame por volta de 1960. O processo foi, então, refinado para a manufatura de vedações de motores nos anos de 1990 e, nos anos 2000, o EBAM foi desenvolvido para ajudar fabricantes a economizar quantidades significativas de tempo e dinheiro na produção de peças metálicas de grande porte e alto valor agregado. Em 2009, *Sciaky* formalmente lançou o EBAM como uma opção de serviço e, em 2011, *Sciaky Inc.* foi selecionada pela *Lockheed Martin Aeronautics* para desenvolver pesquisas em manufatura aditiva de componentes estruturais de titânio para o programa de desenvolvimento da aeronave de combate F-35. Finalmente, em 2014, a *Sciaky Inc.* começou a comercializar o EBAM e a empresa *Lockheed Martin Space Systems* estava entre os primeiros clientes a receber um deste sistema para desenvolver e manufaturar aditivamente tanques de propulsores.

O processo utiliza arame como material de adição e feixe de elétrons como fonte de calor para manufaturar aditivamente peças metálicas dentro de uma câmara com vácuo. Baseando-se em modelos CAD, que são convertidos em código CNC, o cabeçote do EBAM deposita material de adição, camada a camada, até que peça atinja dimensões próximas as finais. Em seguida, o componente recebe tratamento térmico e usinagem de acabamento. O processo é aplicável para a manufatura de peças que possuem desde alguns milímetros até alguns metros de dimensão, sendo a dimensão da câmara de vácuo o fator limitante. Na Figura 14, um esquemático do processo é ilustrado:

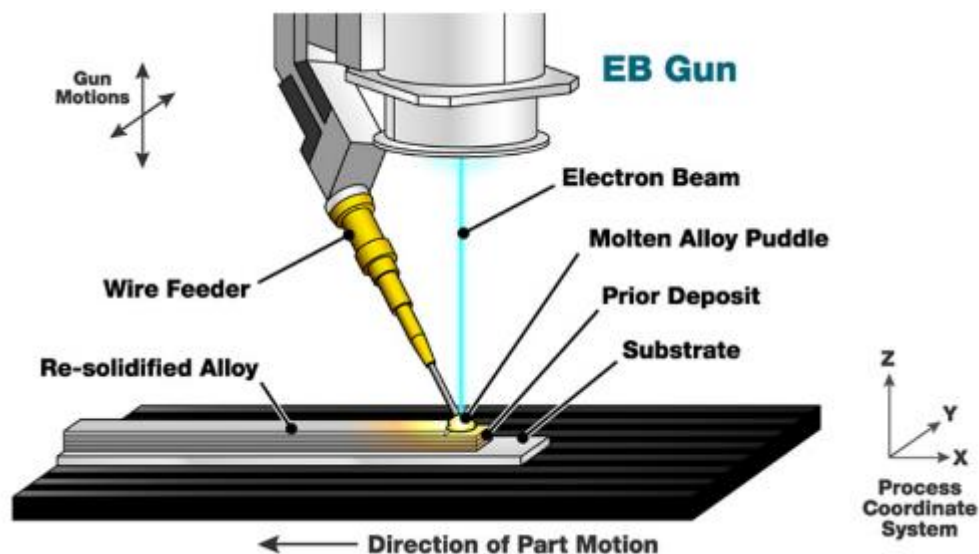


Figura 14: Processo EBAM. Fonte: Sciaky Inc.

O sistema possui controle em malha fechada para se tornar robusto e a taxa de deposição varia de 3 a 9kg de metal por hora, dependendo do material selecionado, e, segundo o fabricante, este é o processo de manufatura aditiva mais rápido do mercado. Para efeito de comparação, a maior taxa de deposição já registrada é de 3kg por hora com processos a laser com alimentação de arame e de 0.2kg por hora com processos baseados em leito com pó.

Outra característica deste processo é a possibilidade da utilização de múltiplos alimentadores de arame para um único feixe de elétrons. Esta opção permite a alimentação simultânea, com programas de controle diferentes, de dois ou mais materiais de adição em uma única poça metálica, o que é ideal para a criação de novas ligas que não são usualmente utilizadas hoje. Além disto, esta configuração permite a manufatura de peças que possuem ligas distintas de acordo com a parte da peça. A Figura 15 abaixo exhibe uma tocha com configuração de duplo arame:



Figura 15: Processo EBAM com configuração de duplo arame. Fonte: Sciaky Inc.

- Laser Metal Deposition-wire (LMD-w)

Laser Metal Deposition-wire é um processo de manufatura aditiva de peças metálicas similar aos dois anteriores em relação a utilização de arame como material de adição, porém se difere quanto a fonte de calor utilizada que neste é um **feixe laser** ao invés de um feixe de elétrons. Uma poça metálica é formada na região sobre a qual o laser é focado e o arame que é alimentado sobre ela se funde formando, assim, uma nova camada de material que possui união metalúrgica com a anterior. Um esquemático do processo é exibido na Figura 16.

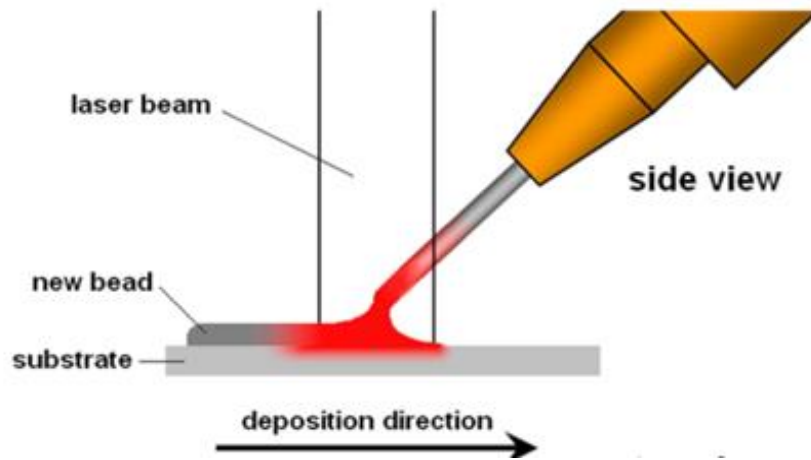


Figura 16: Laser Metal Deposition-wire. Fonte: [19]

1.3 Soldagem a Arco

A seção anterior descreveu diversos processos de Manufatura Aditiva de peças metálicas. Estes processos podem ser divididos em três grandes grupos compreendido entre os que utilizam um **leito coberto com metal em pó**, os que utilizam **metal em pó como material de adição** e os que utilizam **arame como material de adição**. Cada um destes grupos pode, ainda, ser dividido entre os que utilizam **laser**, **feixe de elétrons** ou **arco voltaico** como fonte de calor com exceção do primeiro (leito coberto com metal em pó), para o qual ainda não existe um processo que utilize arco voltaico como fonte de calor.

Este trabalho foi desenvolvido no LABSOLDA que é um instituto de soldagem e mecatrônica, vinculado à UFSC, onde a maior parte das pesquisas é focada **em processos de soldagem por fusão a arco descoberto com eletrodos imersos em atmosferas protetoras**. Desta forma, as pesquisas relacionadas a Manufatura Aditiva que vem acontecendo neste instituto são as que utilizam arco voltaico como fonte de energia e, até então, metal em arame como material de adição. A grande parte dos experimentos de Manufatura Aditiva foi realizada utilizando o processo de soldagem MIG (CMT Advanced) com alumínio como material de adição. Alguns ensaios que utilizaram o processo TIG (Top Tig) com arame de aço como material de adição também já foram realizados no instituto. Em breve, ensaios utilizando o processo PTA-p serão realizados.

Os ensaios para este trabalho foram todos realizados utilizando o processo de soldagem *CMT Advanced* da fabricante austríaca *Fronius*. Portanto, nesta seção serão introduzidos conceitos sobre **Soldagem e Soldagem MIG** além de uma visão geral sobre o **Processo CMT-Fronius**.

1.3.1 Soldagem

A soldagem é usada para unir materiais, similares ou não, de forma permanente tornando impossível a separação por meio não destrutivo. A solda busca proporcionar forte aderência mecânica dos materiais e é um processo que envolve muitos procedimentos da metalurgia como a fusão e a solidificação, que podem trazer problemas práticos no desenvolvimento do processo.

Em outras palavras, soldagem nada mais é do que a junção de duas partes metálicas feita a partir de uma fonte de calor, podendo ou não utilizar pressão. Cuidados como evitar que a área aquecida entre em contato com o ar atmosférico, remoção de resíduos que estão nas superfícies dos materiais e o controle das transformações de fase nas juntas soldadas têm que ser adotados durante o

processos.

A soldagem realizada em estado sólido envolve energia mecânica para poder aproximar a estrutura dos materiais gerando uma atração atômica que pode ser obtida através da ação da fricção, do impacto ou pressão. Já na soldagem por fusão, há um aquecimento localizado dos materiais onde a temperatura deve ser suficientemente alta para fundir ambos metais e, posteriormente, abaixada para permitir a solidificação das partes.

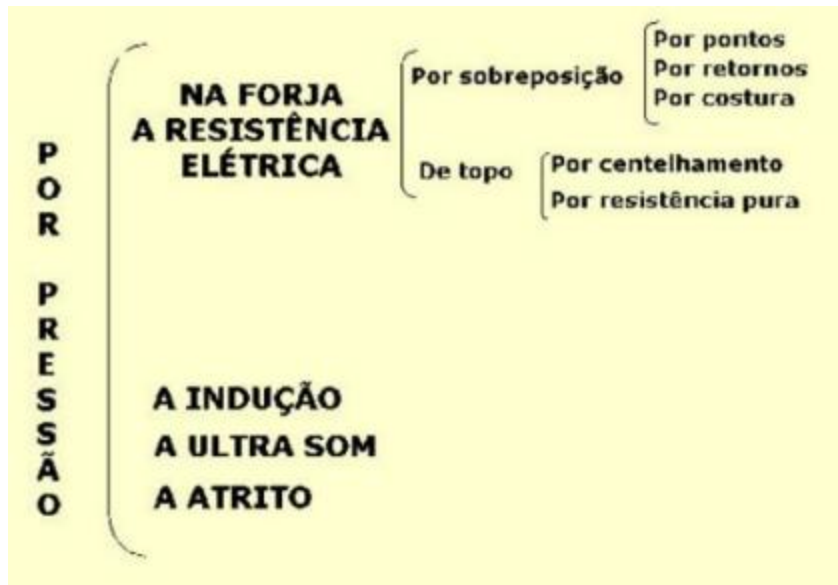


Figura 17: Processos de Soldagem por Pressão



Figura 18: Processos de Soldagem por Fusão

A maior parte dos processos de soldagem estudados no LABSOLDA são do tipo por fusão a arco descoberto com eletrodos imersos em atmosferas protetoras.

Este fato influenciou para que os processos MIG/MAG e TIG fossem os mais discutidos no desenvolvimento deste projeto.

1.3.2 Soldagem MIG

O termo genérico MIG/MAG é utilizado quando se deseja referenciar o processo de soldagem que utiliza eletrodo consumível alimentado continuamente por um sistema mecânico e que utiliza proteção gasosa a partir de gases pressurizados. O termo é uma junção das iniciais das palavras inglesas *Metal Inert Gas* (MIG) e *Metal Active Gas* (MAG) referenciando, respectivamente, ao processo que utilizava somente gás inerte (sendo o mais comum o Argônio) e ao processo que utilizava Dióxido de Carbono que, por se decompor em monóxido de carbono e oxigênio, gerava uma atmosfera ativa [4].

Hoje, a utilização de Argônio puro se tornou restrita somente a soldagem de Alumínio. Em todos os outros casos a presença de certa quantidade de gás ativo é uma obrigatoriedade na atmosfera gasosa. Por isso, as simples designações de MIG ou de MAG se tornou difíceis de serem aplicadas em seus sentidos originais. Exatamente por esse motivo, nos Estados Unidos o processo começou a se chamar GMAW (*Gas Metal Arc Welding*) e na Alemanha MSG (*Metal-schutzgasschweissen*). Originalmente, a designação deste processo era limitado a arames-eletrodos maciços, mas, atualmente, o mesmo termo é utilizado para os casos de utilização de arames tubulares, até mesmo para os que dispensam gases de proteção.

1.3.3 Processo CMT - Fronius

O processo de soldagem *CMT (Cold Metal Transfer)* é uma tecnologia desenvolvida pela empresa austríaca *Fronius* e é caracterizada por possuir uma tocha que apresenta um mecanismo de recuo da alimentação do arame toda vez que uma transferência por curto circuito se inicia.

As primeiras aplicações do modo de transferência CMT ocorreram em 1991 na intenção de unir materiais dissimilares. Teve um grande avanço em 1997, associando ao CMT uma ignição de arco livre de respingos e em 1999 com larga aplicação em micro soldagem. Atualmente, o leque de aplicações do CMT aumentou absurdamente, possuindo aplicações efetivas em todos os setores da indústria, principalmente os setores de óleo e gás (passes de raiz em tubulações e revestimentos), indústria naval

(soldagem de estruturas e montagem de painéis) e empresas em geral que possuem necessidade de soldar materiais dissimilares e especiais (como duplex e superduplex).

No processo CMT, o controle digital reconhece um curto circuito e contribui com o destacamento da gota acionando o recolhimento do arame. Essa é uma enorme vantagem do processo CMT quando comparada à soldagem MIG/MAG com transferência metálica por curto-circuito tradicional.

O controle implementado sobre o processo atua sobre a corrente para mantê-la em uma intensidade muito baixa enquanto ocorre a transferência de material. É possível observar no oscilograma da Figura 19 que há uma fase em que a velocidade de arame é mantida constante para frente (fase de queima) e, assim que um curto-circuito é identificado (pela queda da tensão do arco), o arame inicia um movimento para trás, mantendo velocidade constante em direção oposta a poça de fusão durante um determinado tempo até que haja o destacamento da gota. Naturalmente, a tensão entre o arame e a peça tende a aumentar para valores maiores que zero quando a gota é destacada. O sistema de controle, então, mantém tanto a tensão quanto a corrente em valores constantes em um patamar de alta transferência de energia (fase de *boost*) até entrar, novamente, na fase de queima, que é um patamar com menor nível de energia.

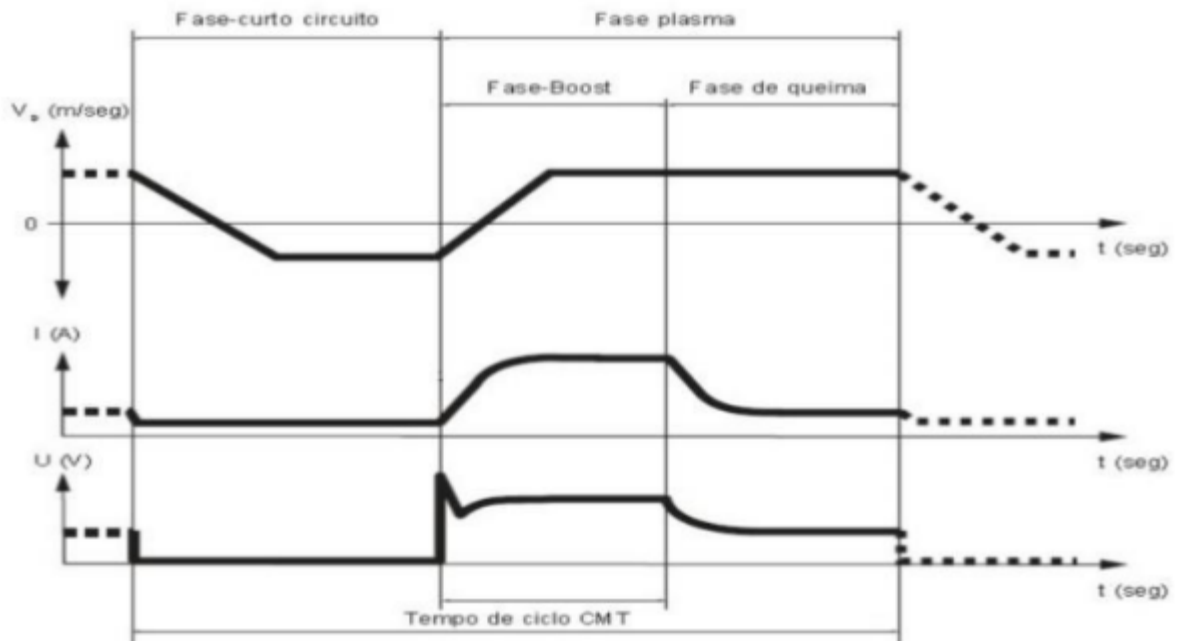


Figura 19: Oscilograma do Processo CMT. Fonte: *Fronius*.

1.3.3.1 Processo CMT Advanced

O CMT Advanced utiliza o mesmo mecanismo de recuo de arame durante a fase de transferência metálica do CMT e o sincroniza com fases onde o eletrodo se torna negativo. Isso gera uma inversão no sentido da corrente e significa que o processo está sendo realizado com corrente alternada. Portanto, o CMT Advanced é o processo CMT realizado com corrente alternada. O CMT comum já é considerado como uma soldagem com baixo aporte de calor. Porém, apresentado pelo fabricante no ano de 2009, o CMT Advanced possui um aporte térmico ainda menor.

O processo se aproveita do fenômeno do aumento da taxa de fusão do eletrodo, quando este é polarizado negativamente, para transferir a mesma quantidade de material que o CMT tradicional, porém com a utilização de menos energia. Isso acontece porque, quando o eletrodo é o polo negativo, o arco ancora acima da ponta do eletrodo “na busca de mais elétrons para emitir”. O período positivo é determinante na penetração do cordão e no efeito de limpeza catódica (no caso de alumínio). O período negativo aumenta consideravelmente a taxa de fusão.

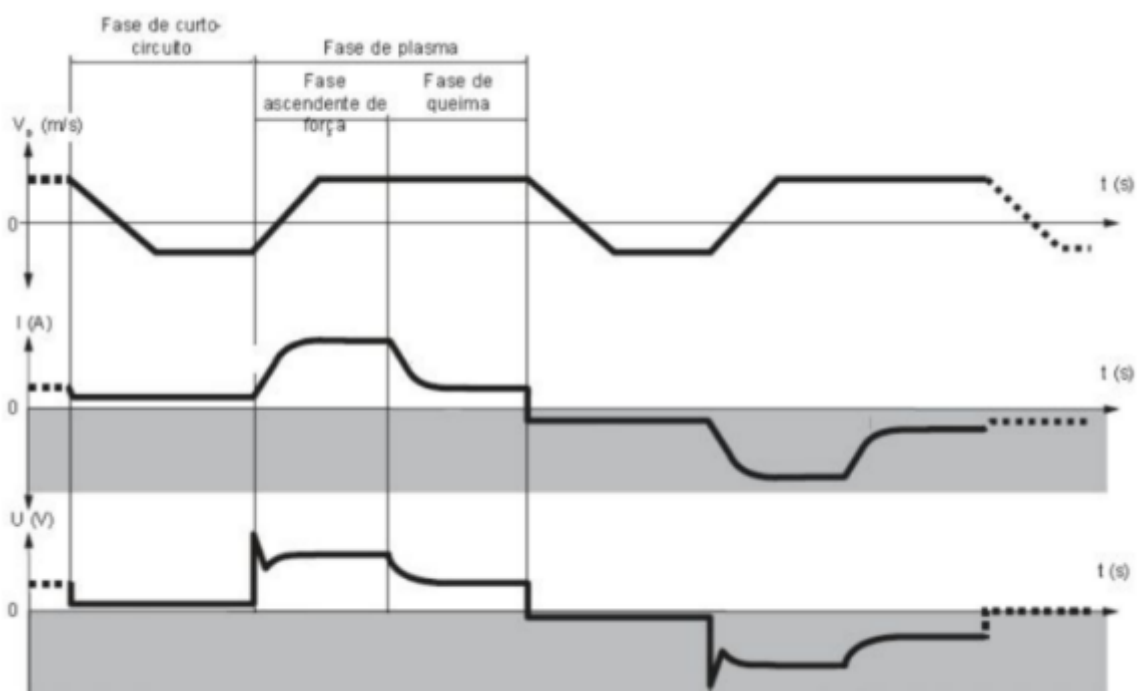


Figura 18: Oscilograma do Processo CMT Advanced. Fonte: Fronius

O baixo aporte térmico do processo CMT Advanced torna-o indicado para soldagem de chapas finas e, devido à baixa diluição resultante, para aplicações de revestimento.

Uma das dificuldades encontradas nos sistemas de soldagem MIG AC é o momento de inversão da polaridade. A inversão de polaridade com o arco aceso no MIG AC tradicional ocasiona muita flutuação, instabilidade e até a extinção do arco. Mas o CMT Advanced aproveita a inexistência do arco durante a fase de curto circuito para realizar a inversão da polaridade. Isso torna o arco estável mesmo com polaridade alternada, resultando em baixos níveis de respingos e fumos.

1.4 Desafios na Manufatura Aditiva via Soldagem a Arco

Apesar de possuírem inúmeras vantagens que foram citadas nas seções anteriores, processos em Manufatura Aditiva ainda enfrentam muitos **desafios** que devem ser superados antes que possam ser amplamente adotados na indústria. Entre os principais, podem ser citadas comparações dos tempos de manufatura de peças realizadas por estes processos quando comparados aos processos mais tradicionais. Outro que merece atenção é a disponibilidade de máquinas com flexibilidade suficiente para trabalhar com diferentes materiais e geometrias necessárias para a fabricação de peças. Entretanto, conforme resultados de estudos se tornam disponíveis, cada vez mais setores da indústria adotarão estas tecnologias e é esperado que estas se tornem gradualmente mais competitivas.

Hoje, equipamentos completos de Manufatura Aditiva que utilizam polímeros (ABS, PLA, PETG) como material de adição podem ser adquiridos comercialmente a partir de R\$3.000. Basicamente, para dar início à manufatura de uma peça ou objeto com estes equipamentos, que usualmente recebem o nome de Impressoras 3D, basta transferir um arquivo CAD em formato STL e “apertar o *play*” para dar início ao processo. Porém, um longo caminho foi percorrido pelos pesquisadores para que fosse possível atingir esse nível de praticidade.

Estas impressoras 3D mais tradicionais utilizam a tecnologia *Fused Deposition Modeling (FDM)*, método patenteado pela empresa *Stratasys*, que se baseia em aquecer e extrudar por um bico um filamento termoplástico. Durante a deposição de material, o cabeçote, que se movimenta no mínimo em três direções (X, Y e Z), descrevendo trajetórias baseadas no modelo CAD sem a necessidade de grandes intervenções do usuário. Em outras palavras, não é necessário que o usuário possua um grande conhecimento do processo para que seja capaz de manufaturar uma peça utilizando um destes equipamentos. Parâmetros como trajetórias e velocidade do cabeçote, temperatura do bico extrusor e da mesa de suporte, quantidade de material depositado e de suporte, entre outros, foram pesquisados, definidos e incorporados ao equipamento pelo fabricante.

A consolidação da ciência da Manufatura Aditiva de Metais ainda não está no mesmo patamar da Manufatura Aditiva de Polímeros e este é o principal motivo para ainda não existir, hoje, uma *impressora 3D de peças metálicas* que esteja em nível comercial. Manipular metal em estado líquido de forma a garantir as propriedades metalúrgicas especificadas em projeto é um desafio mais complicado do que realizar o mesmo utilizando polímeros. Estes desafios serão discutidos nas seções subsequentes focando na utilização de processos MIG para a Manufatura Aditiva via Soldagem a Arco+Arame ou, em inglês, *Wire-Arc Additive Manufacturing (WAAM)*.

Na pesquisa em Manufatura Aditiva de Peças Metálicas é fundamental que as especificações de projetos estejam bem definidas. Isso é devido ao fato de ser teoricamente impossível manufaturar uma peça que não possua “defeitos”. Em outras palavras, um poro com 2mm de diâmetro poderia ser perfeitamente aceito em uma peça de aço com 6m de comprimento e 1000kg de massa. Porém, uma falta de fusão de 20mm ou alguma inclusão de material já poderia não ser.

É necessário manter em mente que enquanto em processos de fabricação tradicionais as propriedades já estão fixadas na matéria prima, na Manufatura Aditiva as propriedades são criadas em “tempo real” conforme o material é depositado e as estruturas formadas. Somente isso, por si só, já exige um maior nível de garantia de qualidade e controle de processo, impondo grandes desafios aos pesquisadores que vem se dedicando ao domínio desta arte.

1.4.1 Parâmetros Elétricos

Durante a deposição de material, o processo de soldagem está sujeito a perturbações dos mais diversos tipos. A maioria destas são resultados direto de variações nas condições físicas do processo enquanto outras estão relacionadas a variações no equipamento. O problema mais comum a ser resolvido é o controle da distância entre a ponta do arame e a poça de fusão. Este controle é importante para garantir a estabilidade do processo ao evitar a formação de gotas na ponta do arame e também ao evitar que este se choque contra o substrato por estar “entrando muito frio” na poça - este último comportamento gera uma tendência a formação de regiões com falta de fusão [19]. Este tipo de controle depende diretamente da capacidade do equipamento em manter a correta velocidade de alimentação de arame juntamente com o aporte térmico ideal fornecido através da formação de um arco voltaico entre o arame e o substrato/peça pela imposição de uma diferença de potencial realizada por uma fonte de corrente ou tensão.

A escolha dos parâmetros elétricos influencia diretamente a geometria do cordão que pode ser definida como as medidas de sua largura e altura. Influenciam, também, as propriedades metalúrgicas do produto final e até se o processo de deposição de material camada sobre camada será viável sem que os cordões escorram. Intuitivamente, este último gera uma tendência a escolha de parâmetros com menor aporte térmico devido a maior probabilidade das gotas que são depositadas se sustentarem sobre o cordão anterior.

Fisicamente, em processos MIG, que é o processo de soldagem a arco focado neste projeto, se fixadas todas as variáveis, quanto maior o aporte térmico fornecido a peça maior a molhabilidade do cordão e conseqüentemente maior a sua largura. Por outro lado, se fixado todos os parâmetros inclusive o aporte térmico, quanto maior a velocidade de arame maior a altura do cordão resultante.

Tal comportamento faz com que a escolha dos parâmetros elétricos influencie a geração de trajetórias. Um dos motivos é devido ao fato da largura dos cordões influir na definição do *offset* necessário entre dois destes consecutivos que, por ventura, determina o número de trajetos necessários por camada.

Além disto, a altura do cordão determina o número de fatias em que a peça deve ser decomposta. A correta estimativa destas alturas é outro desafio na Manufatura Aditiva via Soldagem a Arco e será introduzido na seção 1.4.4.

1.4.2 Geração de Trajetórias

Como muito discutido nas seções anteriores, Manufatura Aditiva é um processo de fabricação do qual o produto é obtido em dimensões já próximas da final. No caso de processos que utilizam leito com pó, o laser ou o feixe de elétrons é projetado ou disparado pelo canhão de forma a respeitar a geometria da peça desejada. Porém, no caso de processos que utilizam adição de material, é necessário que exista um movimento relativo entre o cabeçote e a peça tal que as trajetórias resultantes representem a geometria da peça desejada.

As *impressoras 3D* comerciais são exemplo no qual o material (polímero) e a fonte de calor (bico extrusor) são acoplados a um cabeçote movimentado por motores através de guias. Há a possibilidade da base também se movimentar de forma similar. O cabeçote e a base, em conjuntos, podem ser definidos como um manipulador cartesiano que se movimenta nas direções X, Y e Z, como ilustrado na Figura 19:

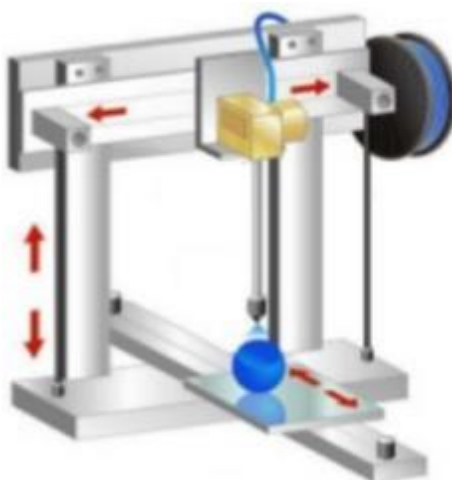


Figura 19: Esquemático de uma *Impressora 3D Comercial*. Fonte: Google.

Já na Manufatura Aditiva via Soldagem a Arco, a fonte de calor é uma **Tocha de Soldagem** que, como já discutido anteriormente, pode ser tanto uma tocha **TIG**, uma **MIG** ou uma **PTA-p**. Aqui, também, deve existir um movimento relativo entre a tocha e a peça.

Encontrar métodos de geração de trajetórias que sejam eficazes é o primeiro de vários fatores que influenciam na formação de defeitos básicos como, por exemplo, falta de fusão. Juntamente com muitos outros parâmetros que devem ser conhecidos e estudados a priori, possuir um bom método de geração de trajetórias é importante para que seja possível atingir a geometria e o nível de qualidade desejados.

Tipicamente, o desafio da geração de trajetórias na Manufatura Aditiva via Soldagem a Arco podem ser encarados de duas formas. Uma é se preocupando, primeiramente, em manufaturar a peça como um todo para, somente em seguida, executar ensaios que averiguem a integridade da peça e mensurem os tamanhos e a distribuição dos defeitos. Estes ensaios podem compreender ensaios destrutivos e não destrutivos. Entre os destrutivos podem ser citados os ensaios de tração, cisalhamento, dobramento, flexão, embutimento, torção, dureza, fluência, fadiga e impacto. Já entre os não destrutivos podem ser realizados o ensaio de líquido penetrante, partículas magnéticas, ultrassom e radiografia industrial. Estes ensaios visam averiguar se a peça manufatura cumpre com os requisitos de projeto pré-estabelecidos. Assim, caso necessário, ajustes no processo de manufatura aditiva como, por exemplo, alterações no aporte térmico durante o processo, devem ser realizados na busca de atender as especificações.

Outra forma é focar, primeiramente, no controle do processo e na integridade estrutural de uma pequena unidade construtiva como, por exemplo, um pequeno círculo ou triângulo para, em seguida, utilizar várias destas pequenas unidades geométricas para construir objetos maiores e com maior complexidade geométrica. Esta abordagem é possível devido ao fato que, na Manufatura Aditiva de Peças Metálicas, as propriedades metalúrgicas da peça, como a micro e macro estrutura, são formadas durante o processo, diferentemente de outros processo de fabricação, como a usinagem, nos quais as propriedades mecânicas e metalúrgicas da matéria-prima pouco se alteram.

Por fim, a geração de trajetórias acaba por ser diretamente dependente da geometria do cordão que está sendo depositado. Juntamente ao parâmetro *Velocidade de Soldagem*, que pode ser considerado um parâmetro de trajetória, *Parâmetros Elétricos* influenciam diretamente na geometria do cordão, fato que será exposto na seção seguinte.

1.4.3 Dissipação de Calor

Como citado na seção anterior, um dos grandes desafios na Manufatura Aditiva via Soldagem a Arco é a grande quantidade de calor envolvida em processos de soldagem tradicionais tanto que processos que fornecem menores aportes térmicos são os usualmente escolhidos. Porém, há um mínimo de energia necessário para que a transferência metálica seja possível e que a partir do qual o processo de soldagem torna-se inviável. Além disto, como será exposto no decorrer deste documento, muitas vezes é requerido que parâmetros com maiores níveis de energia sejam utilizados para que determinados níveis de qualidade metalúrgica e de produtividade sejam atingidos.

A molhabilidade de processos MIG, para um mesmo material, é diretamente relacionada a temperatura do processo no sentido de quanto maior a temperatura envolvida mais a gota se espalhará sobre o substrato/peça e conseqüentemente mais largo será o cordão. Isto significa que, se o processo atingir determinada temperatura, os cordões se espalharão a tal ponto de não se sustentarem sobre a camada anterior e não formarão, assim, uma parede como é o desejado em aplicações de manufatura aditiva.

Desta forma, um outro grande desafio na Manufatura Aditiva via Soldagem a Arco é a retirada de calor das aplicações que exigem altos níveis energéticos e até mesmo de aplicações onde objetiva-se peças de menores dimensões - aplicações, estas, que podem se tornar inviável devido à falta de dissipação suficiente mesmo com a utilização de parâmetros elétricos que fornecem o mínimo de energia.

Assim que o processo de deposição de camadas se inicia, há a formação de um gradiente térmico no qual as regiões mais quentes se localizam na região onde ocorre a transferência metálica. Se a dissipação de calor do sistema for ineficiente, a peça como um todo tenderá a aquecer conforme o processo se desenvolve. Isto significa que a probabilidade da transferência metálica ocorrer a uma determinada temperatura no início do processo e ocorrer a uma temperatura diferente no final do processo é alta. Tal efeito faz com que, mesmo utilizando os mesmos parâmetros, não só a geometria dos cordões se altere, mas também a microestrutura resultante. Tal fenômeno nem sempre é o desejado por acarretar uma série de dificuldades, dentre as quais pode ser citada a necessidade de se determinar diferentes parâmetros de usinagem para diferentes partes da mesma peça.

O ideal é que o calor seja dissipado de tal maneira que a transferência metálica ocorra a uma mesma temperatura do início ao fim do processo de manufatura da peça. Mas, para isso, sistemas realimentados com medição (de temperatura, como pirômetro ou imagens térmicas) e atuação (variação da vazão, da temperatura do líquido refrigerante ou até do volume interno do dispositivo de refrigeração) devem ser desenvolvidos.

1.4.4 Estimativa da Altura dos Cordões

Um dos parâmetros mais importantes em qualquer processo de manufatura aditiva é a altura dos cordões que são depositados em cada uma das camadas da peça. Este parâmetro define o tamanho do incremento na direção da altura que a peça ou a tocha deve realizar antes que a deposição de uma nova camada seja iniciada.

A correta determinação das alturas dos cordões é de especial importância no caso de processos de soldagem MIG para que a Distância Bico de Contato-Peça (DBCP) se mantenha constante no valor inicial determinado, já que variações neste parâmetro influenciam diretamente a geometria do cordão de solda uma vez que alteram a intensidade da corrente em processos convencionais [21] ou a tensão, no caso de fontes com imposição de corrente. Além disto, mudanças na DBCP geram alterações na interface arco-peça, o que significa que tanto a pressão quanto a geometria do arco se alteram causando, conseqüentemente, alterações na área superficial afetada.

Além da questão da influência sobre suas geometrias pela alteração da DBCP, a correta determinação da altura dos cordões é essencial para que o processo se desenvolva do começo ao fim sem que haja ou colisão da tocha com a peça, devido a quantidade insuficiente de incrementos na direção da altura, ou perda da proteção gasosa, devido a incrementos excessivos.

Para ilustrar a importância de superar o desafio de obter uma boa estimativa das alturas dos cordões que são depositados, é considerada uma situação hipotética na qual a altura real destes seja de 2mm, mas a configurada nas trajetórias possui valor de 1,8mm – erro de 0,2mm por camada. Se a DBCP inicial do processo for de 12mm, após 60 camadas a tocha de soldagem se chocará com a peça, ou seja, o processo teria que ser interrompido após a peça atingir apenas 12cm de altura. Por outro lado, se o valor estimado for maior que o real, a proteção gasosa perderá seu efeito rapidamente e o processo, também, terá que ser interrompido.

1.5 Objetivos

O LABSOLDA é um instituto relacionado a Universidade Federal de Santa Catarina (UFSC) que foca suas atividades em pesquisas e desenvolvimento de processos, procedimentos e equipamentos na área de soldagem. Fundado em 1973, através de uma parceria entre professores brasileiros e alemães, o instituto sempre demonstrou profunda preocupação na independência tecnológica do Brasil ao buscar soluções para os problemas de soldagem tanto de união como de revestimento metálico.

A estratégia adotada foi a de aproveitar as demandas de desenvolvimento de novos processos e procedimentos para também desenvolver os equipamentos necessários para executá-los. Esta estratégia garantiu não só que o laboratório estivesse sempre equipado com os equipamentos de soldagem mais modernos, mas garantiu, também, o entendimento e os domínios das tecnologias utilizadas nestes equipamentos.

Apesar de toda infraestrutura disponível nenhuma aplicação de manufatura aditiva havia sido realizada no laboratório. Porém, hoje, com a chegada da 4ª Revolução Industrial, surgiu a necessidade do domínio destes procedimentos. Mas toda uma estrutura deve ser adaptada e desenvolvida para que o desenvolvimento e o estudo de procedimentos como estes se tornem possíveis.

O Objetivo Geral deste projeto é viabilizar as condições mínimas necessárias para que pesquisas de procedimentos em Manufatura Aditiva de Peças Metálicas via Soldagem a Arco sejam possíveis no LABSOLDA. Deve-se utilizar os equipamentos disponíveis no laboratório e desenvolver softwares e aparatos que se demonstrem necessários.

1.5.1 Objetivos Específicos

O mínimo necessário para a realização de ensaios de Manufatura Aditiva via Soldagem a Arco+Arame é uma **Fonte de Soldagem** a Arco com Deposição de Arame e um **Manipulador Robótico**. O primeiro é devido à natureza deste processo de manufatura no qual um arco voltaico é utilizado como fonte de calor e material em forma de arame é adicionado; e o segundo é necessário devido ao nível de precisão e repetitividade de movimentos requeridos para estas aplicações.

No LABSOLDA há diversas fontes de soldagem a arco que podem e devem ser utilizadas em pesquisas que envolvam Manufatura Aditiva. Embora os processos que oferecem menor aporte térmico sejam intuitivamente os preferidos para aplicações de Manufatura Aditiva, nenhum processo a arco deve ser descartado em pesquisas. Isto inclui a utilização não só de processos MIG, mas também de processos TIG e PTA-p. Desta forma, o primeiro Objetivo Específico deste projeto é a **Escolha de um Processo** e a **Definição de Parâmetros** que tornem a deposição de material, camada sobre camada, viável.

Após a definição de um processo de soldagem e de parâmetros que tornam a construção de uma parede viável, é necessário desenvolver um método eficiente para a **Geração de Trajetórias** que possa ser utilizado nos manipuladores antropomórficos da fabricante *Motoman* presentes no laboratório. Este método deve ser simples o suficiente para que pesquisadores não acostumados a programação sejam capazes de gerar trajetórias tanto de forma interativa, na qual as dimensões do sólido são inseridas pelo usuário, quanto de forma automática baseando-se em modelos CAD.

Além disto, devem ser propostos métodos de **Dissipação de Calor** para que a manufatura aditiva de peças de dimensões menores ou que exigem parâmetros elétricos mais energéticos, se torne mais produtiva. O acúmulo de calor é um grande empecilho para a produtividade na fabricação destes tipos de peças onde, muitas vezes, é exigido um tempo de resfriamento entre camadas. Este tempo de resfriamento é indesejado do ponto de vista da produtividade.

Por fim, como último objetivo específico, deve-se desenvolver um método robusto e eficiente para **Estimar a Altura dos Cordões** e, então, utilizar este valor para determinar as intensidades dos incrementos na direção altura que o manipulador deve realizar após o término de cada camada.

2 DESENVOLVIMENTO

O desenvolvimento deste projeto foi inteiramente realizado no LABSOLDA que é um laboratório de soldagem e mecatrônica ligado à Universidade Federal de Santa Catarina (UFSC). Atuando desde 1974 na área de soldagem de união e de revestimento, o laboratório demonstra grande preocupação não só em colocar em prática os resultados obtidos em suas pesquisas, mas também em contribuir para a independência tecnológica do país dominando tecnologias já consagradas e desenvolvendo os próprios equipamentos.

Ao longo destes anos de atuação, o LABSOLDA se tornou o laboratório de soldagem com a melhor e maior infraestrutura do país alcançando autonomia em termos de equipamentos para todas as bancadas de dissertação de mestrado e teses e doutorado.

Este projeto utilizou a infraestrutura existente no laboratório, comumente utilizada para soldagem de união e de revestimento, e criou as condições mínimas necessárias para que pesquisas em Manufatura Aditiva via Soldagem a Arco+Arame se tornassem viáveis.

O desenvolvimento dos procedimentos, softwares e periféricos que se demonstraram necessários para a realização deste projeto é detalhado nos tópicos a seguir.

2.1 Escolha do Processo de Soldagem e Definição dos Parâmetros

O LABSOLDA colecionou uma vasta variedade de fontes dos mais diversos processos de soldagem ao longo dos seus 43 anos de história. Muitas destas fontes podem ser utilizadas para aplicações de Manufatura Aditiva via Soldagem a Arco. Dentre as quais merecem destaque o *TipTig*, *PTA-p*, *TopTig* e *CMT*.

Apesar dos dois primeiros processos possuírem enorme potencial de aplicação em Manufatura Aditiva de Peças Metálicas e o TopTig já ser consolidado na área, como é possível verificar sua aplicação na manufatura de vasos de pressão para a indústria nuclear em [29], além de peças de aço que já foram manufaturadas no LABSOLDA utilizando o mesmo processo, **o processo de soldagem escolhido para o desenvolvimento deste projeto foi o Cold Metal Transfer (CMT)**, da fabricante austríaca *Fronius*. Este é um processo relativamente novo caracterizado por fornecer baixo aporte térmico, baixos níveis de respingos e altas taxas de deposição. Estudos sobre soldagem de chapas finas e revestimentos com baixa taxa de diluição para ligas de alumínio utilizando o *CMT* podem

ser amplamente encontrados na literatura. É constatado que o processo fornece um excelente controle na transferência de gotas e na diluição[23].

Hoje, a fabricante oferece quatro variações do processo *CMT* que se diferem pelas diferentes formas de transferência de gotas: *CMT*, *CMT Pulse (CMTP)*, *CMT Advanced (CMT-ADV)* e *CMT Pulse Advanced (CMT-PADV)*. Devido a elevada estabilidade e regularidade da transferência metálica e deposição específica de material, o *CMT* é um processo em potencial a ser usado em aplicações de Manufatura Aditiva via Soldagem a Arco+Arame. Detalhes sobre cada uma destas variações podem ser encontrados na seção 1.3.3.

As características geométricas e metalúrgicas dos cordões dependem diretamente dos parâmetros de soldagem que podem ser compreendidos por **Velocidade de Soldagem, Velocidade de Arame, Potência da Fonte de Soldagem, DBCP**, entre outros. É intuitivo que velocidades de soldagem muito altas tendem a gerar cordões não-homogêneos com falhas na geometria ao longo do seu comprimento. Por outro lado, velocidades de soldagem muito baixas tendem a formar cordões muito largos. Em relação ao arame, altas taxas de deposição tendem a fornecer calor excessivo a peça e taxas muito baixas tendem a gerar cordões descontínuos.

A primeira tentativa de obter uma parede de alumínio, mostrada na Figura 20, foi realizada com arame de liga Al4043 com 1.0mm de diâmetro com programa sinérgico *CMT-Pulse*. Essa configuração foi utilizada nesse primeiro teste por ser desse arame a bobina que estava instalada na fonte de soldagem no momento da integração robô-fonte. E o programa *CMT-Pulse* por ser este o único programa sinérgico disponível na memória da fonte de soldagem.



Figura 20: Primeira tentativa de deposição camada sobre camada.

Nesta primeira tentativa (ilustrada acima), as deposições foram realizadas em Direção Igual [24], ou seja, o material foi depositado somente em uma direção que, neste caso, foi da esquerda para direita da foto. Apesar dos cordões não terem escorrido, defeitos de geometria são aparentes tanto no início da parede quanto ao longo de sua extensão. O primeiro é devido ao robô iniciar o movimento antes da abertura do arco e está relacionado à ausência de um sinal que represente esse evento; o segundo defeito é devido ao primeiro cordão não ter sido um cordão contínuo devido a escolha de uma má relação entre a Velocidade de Soldagem e a Velocidade de Arame. Tais constatações evidenciam a necessidade da criação de rotinas e parametrizações específicas para o início da soldagem, para o primeiro cordão depositado e, quando exigido, para a realização de mudanças no sentido da soldagem.

A parede da Figura 21 foi realizada com os mesmos parâmetros da anterior, mas com deposições em Direção Reversa. Ou seja, o material foi depositado tanto da direita para esquerda quanto da esquerda para direita, continuamente, sem que o arco fosse extinto em algum momento.



Figura 21: Tentativa de formação de parede com deposição em Direção Reversa

O excesso de material que é possível observar nas extremidades da parede é resultado das paradas que o manipulador tem que executar para realizar a mudança de direção nos movimentos.

Os ensaios mostrados na Figura 22 foram realizados com o intuito de observar o comportamento do processo quando realizados movimentos circulares pelo manipulador. Variáveis como Velocidade de Soldagem e Incrementos em Z foram alteradas entre os testes para que seus efeitos na geometria das paredes fossem observados. Os parâmetros utilizados nestes ensaios, tanto elétricos quanto de trajetória, não serão descritos neste documento por questões de confidencialidade.



Figura 22: Movimentos circulares com variação de Velocidade de Soldagem e Incrementos em Z.

Defeitos de descontinuidade que se propagam ao longo da altura são evidentes nas peças até então manufaturadas. A propagação destes defeitos aos cordões subsequentes demonstra a importância da seleção dos parâmetros utilizados na primeira camada. Esta importância é devido ao fato que a primeira camada servirá de suporte para todas as camadas seguintes e qualquer inconsistência de geometria presente neste primeiro cordão irá se propagar para os cordões seguintes tornando a peça inutilizável.

Desta forma, realizou-se esforços para determinar parâmetros que forneçam um cordão com geometria totalmente homogênea para servir como a primeira camada do processo. Após algumas tentativas, obteve-se cordões considerados apropriado para esta finalidade e a suas aparências podem ser observadas na Figura 23.



Figura 23: Aparência de cordões considerados apropriados para primeira camada.

Foi, então, realizada uma tentativa de manufaturar uma peça cilíndrica com os parâmetros levantados para este primeiro cordão. Porém, devido ao fato destes parâmetros serem mais energéticos, a quantidade de calor que a peça iria acumular durante o processo de sua manufatura se tornou um fator preocupante antes mesmo da primeira tentativa. Por este motivo decidiu-se aumentar o diâmetro da peça para 80mm com a intenção de tentar contornar o problema do acúmulo de calor. Mesmo assim, como é possível observar na Figura 24, a dissipação de calor não foi suficiente para que os cordões se sustentassem um sobre o outro.



Figura 24: Processo de manufatura aditiva com dissipação de calor insuficiente

Realizou-se, então, uma configuração de sincronia entre o manipulador e a fonte de soldagem na qual, após finalizada o primeiro cordão, o manipulador envia para a fonte um comando para que esta troque os parâmetros de soldagem para uma configuração que forneça menos energia a peça. No caso de processos MIG com configurações sinérgicas, como este, isto significa, também, uma menor velocidade de arame.

A peça resultante deste ensaio com sincronia Manipulador-Fonte é exibida na Figura 25, onde é possível observar claramente a diferença entre as geometrias do primeiro e de todos os outros cordões subsequentes.



Figura 25: Primeira peça manufaturada com mudança de parâmetros elétricos durante o processo

A Figura 26 exibe uma segunda peça manufaturada ao lado da primeira para demonstrar a robustez do processo.



Figura 26: Peça idêntica manufaturada ao lado da primeira

Os parâmetros de soldagem utilizados nestes ensaios serão omitidos deste documento por questões de confidencialidade.

2.2 Geração de Trajetórias

Hoje, a grande maioria das pesquisas em soldagem exige a utilização de manipuladores robóticos para garantir que a movimentação da tocha respeite rigorosamente a dinâmica desejada pelo pesquisador. Isto exige, muitas vezes, que células de soldagem sejam readaptadas para cada aplicação e manipuladores sejam fixados de formas não usuais, como é possível verificar o manipulador robótico fixado ao teto em [29].

Além da coleção de fontes de soldagem, o LABSOLDA possui uma coleção de manipuladores composta por robôs cartesianos (Tartilopes) e antropomórficos (HP20D, SIA10D e UP6). Como descrito na seção anterior, o processo *CMT Advanced* da fabricante *Fronius* foi o processo escolhido para o desenvolvimento do projeto apresentado neste documento. Já em relação ao manipulador, o escolhido foi um robô antropomórfico da fabricante **Motoman** modelo **HP-20D** que será descrito nas seções seguintes.

2.2.1 Manipulador Antropomórfico HP20D

O manipulador utilizado no desenvolvimento deste projeto, ilustrado na Figura 27, é um robô antropomórfico da fabricante *Motoman* que é uma subsidiária da gigante japonesa do setor elétrico *Yaskawa*. Atua no desenvolvimento de soluções para a robotização de processos industriais que incluem soldagem a arco e a ponto, montagens, pintura, corte, manuseio e remoção de materiais. É a segunda maior fabricante de robôs industriais nos Estados Unidos e a maior no continente asiático.



Figura 27: Manipulador Antropomórfico *Motoman* HP-20D.

Toda esta série de corpos rígidos interligados por juntas que compõe um robô antropomórfico não teria nenhuma utilidade se não estivesse integrado a um sistema de controle. Esse sistema de controle é o responsável em determinar como o Servo motor de cada uma das juntas do robô deve se movimentar para que a TCP (*Tool Center Point*) configurada realize a trajetória desejada. Cada um dos dois robôs presentes no LABSOLDA é controlado por um controlador modelo DX100. Uma única unidade desse controlador é capaz de controlar até 8 robôs, totalizando 72 eixos, em aplicações que demandam tais configurações.

O DX100 utiliza um controle chamado de *Teach Pendant*, exibido na Figura 28, como forma de interface com o usuário. Através deste *Teach Pendant*, o usuário obtém domínio sobre o robô e se torna capaz de movimentar cada um dos eixos de forma individual ou a TCP em coordenadas cartesianas ou polares. Algoritmos contendo trajetórias e lógicas sequenciais podem ser desenvolvidos interativamente movimentando o manipulador até pontos da trajetória e realização a gravação destes pontos em uma operação chamada de *teaching*.



Figura 28: *Teach Pendant* do controlador DX100 da Motoman

Uma outra forma de programar estes robôs é desenvolvendo os algoritmos de movimentação em um computador e depois transferindo-os ao controlador através de uma porta USB na chamada Programação Off-line. Além de mais elegante, esta abordagem de programação evita que as atividades da célula e do manipulador real sejam interrompidas (acarretando em perdas de produtividade) e diminui a probabilidade de acidentes devido a colisões do robô com outros equipamentos da célula devido a erros de programação [30].

Para aplicações de Manufatura Aditiva, considera-se apenas a segunda abordagem devido a precisão exigida e ao elevado número de pontos necessários para descrever trajetórias que representem peças completas. O fato de existir a necessidade de movimentar o manipulador a cada um destes pontos para realizar o *teaching* (marcação do ponto) torna a primeira forma de programação citada extremamente inviável nestas aplicações.

As seções a seguir farão uma introdução sobre a linguagem utilizada e a estrutura dos programas utilizados nestes robôs.

2.2.1.1 Linguagem INFORM III

Os movimentos deste manipulador são programados através de uma linguagem desenvolvida pela própria *Motoman* chamada *INFORM III*. Pode-se dizer que esta linguagem se assemelha a uma mistura de Código G (utilizada em máquinas CNC) com Assembly (linguagem de baixo nível utilizada em microcontroladores). É uma linguagem interpretada, ou seja, não é necessário compilar e os comandos são executados em tempo real. Estes comandos são compostos de **Instrução** e **Itens Adicionais**, como exibidos na Figura 29.

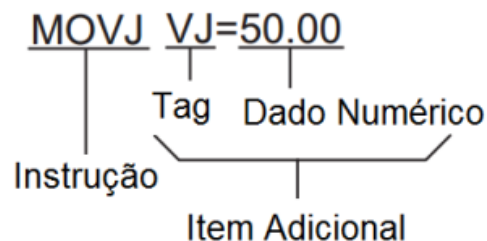


Figura 29: Comando de Movimentação em INFORM III [25]

A Instrução é usada para executar o movimento ou o processamento de acordo com o desejado pelo programador. As Instruções de movimento são apenas 4, sendo elas: MOVL (linear), MOVJ (joints), MOVC (circular) e MOV S (spline). Já as Instruções de processamento podem ser diversas como, por exemplo, operações aritméticas ou matriciais, de temporização, de condição e de leitura ou escrita nas portas digitais.

As instruções são divididas de acordo com a tabela da Figura 30.

Type	Content	Instruction Example
I/O Instruction	It is the instruction used to control the I/O.	DOUT, WAIT
Control Instruction	It is the instruction used to control the processing and operation.	JUMP, TIMER
Operating Instruction	It is the instruction by which the variables, etc. are used and operated.	ADD, SET
Move Instruction	It is an instruction concerning the movement and the speed.	MOVJ, REFP
Shift Instruction	It is an instruction used when a present teaching position is shifted.	SFTON, SFTOF
Instruction which adheres to instruction	It is an instruction which adheres to the instruction.	IF, UNTIL
Work Instruction	It is an instruction concerning work, such as arc welding and handling.	ARCON, WVON
Optional Instruction	It is an instruction concerning optional functions. It can only be used when the function is available.	-

Figura 30: Grupos de instruções da linguagem INFORM III [25]

O Item Adicional é inserido de acordo com o tipo de instrução e com a necessidade. Alguns exemplos destes itens adicionais são velocidade de movimento, nível de precisão e variáveis diversas.

Dentre as variáveis existentes no Controlador DX100, as **Variáveis de Usuário** merecem atenção especial devido ao escopo deste projeto e serão detalhadas a seguir.

2.1.1.1.1 Variáveis de Usuário

Variáveis de Usuário são variáveis disponíveis no Controlador DX100 para auxiliar a programação das lógicas desejadas. Diferentemente das Variáveis do Sistema, que representam estados em que o sistema se encontra e não permitem alteração por Software, Variáveis de Usuários permitem mudanças de seus valores de acordo com o desejado pelo usuário. Ou seja, enquanto Variáveis do Sistema permitem somente leitura as Variáveis de Usuários permitem tanto escrita quanto leitura.

Variáveis de Usuários geralmente são utilizadas para armazenar contadores, resultado de cálculos e valores de sinais de entrada. São essenciais em operações onde é importante controlar o número de peças, o número de vezes que o programa já foi executado e para executar troca de informações entre programas distintos.

A tabela com os tipos de Variáveis de Usuário disponíveis pode ser visualizada na Figura 31.

Data Format	Variable No. (pcs)	Functions
Byte Type	B000 to B099 (100)	Range of storable values is from 0 to 255. Can store I/O status. Can perform logical operations (AND, OR, etc.)
Integer Type	I000 to I099 (100)	Range of storable values is from -32768 to 32767.
Double Precision Integer Type	D000 to D099 (100)	Range of storable values is from -2147483648 to 2147483647.
Real Type	R000 to R099 (100)	Range of storable values is from -3.4E+38 to 3.4E38. Accuracy: $1.18E-38 < x \leq 3.4E38$
Character Type	S000 to S099 (100)	Maximum storable number of characters is 16.
Position Type	P000 to P127 (128)	Can store position data in pulse form or in XYZ form.
	BP000 to BP127 (128)	XYZ type variable can be used as target position data for move instructions, and as incremental values for parallel shift instructions.
	EX000 to EX127 (128)	

Figura 31: Variáveis de Usuário disponíveis no DX100 [25]

Dentre as Variáveis de Usuário disponíveis no Controlador DX100, as Variáveis de Posição merecem destaque neste documento por permitirem que a programação da manufatura de uma peça seja toda realizada em um computador, testada e, somente então, enviada ao robô.

2.1.1.1.1 Variáveis de Posição

As Variáveis de Usuário do tipo “de Posição” devem ser destacadas nesse relatório devido ao fato de permitirem o armazenamento de informações que representam pontos no espaço para os quais a TCP do manipulador pode ser enviada. Em poucas palavras, Variáveis de Posição armazenam informações que representam posições no espaço.

Este tipo de variável permite uma forma de programar mais flexível onde não existe a necessidade de fisicamente mover o manipulador até cada um dos pontos para realizar a marcação, como normalmente é realizado em programação on-line em modo *teaching*.

As variáveis de posição podem ser de dois tipos: Pulsos ou Coordenadas Cartesianas.

Variáveis de Posição do tipo Pulsos possuem campos denominados como S, L, U, R, B e T. Cada um destes campos representa um eixo do robô e seus valores representam o valor do contador de pulsos do *encoder* absoluto relativo ao motor específico daquele eixo. A visualização destes campos pode ser observada na Figura 32.



Figura 32: Registro de uma Variável de Posição em modo Pulso [25]

Os campos relativos a cada um dos eixos podem ser preenchidos manualmente pelo usuário. Uma outra forma de preenchimento destes campos é pressionando as teclas “Modify+ENTER”. Desta forma, os campos são preenchidos automaticamente com valores que representam a posição na qual o manipulador se encontra no momento.

Variáveis de Posição do tipo Pulso servem para armazenar informações que representam pontos no espaço. Porém, visualizar o local no espaço que a combinação do giro de cada um dos seis eixos representa é uma tarefa árdua para os humanos. Esta forma de armazenagem de informação é mais útil para aplicações que exigem rotações de apenas algum eixo em específico como, por exemplo, movimentação de cargas em uma esteira rolante. Desta forma, para aplicações de manufatura aditiva, o usual é que se use Variáveis de Posição do tipo Coordenada Cartesiana.

Os campos das Variáveis de Posição do tipo Coordenadas Cartesianas, que podem ser visualizados na Figura 33, são bem mais amigáveis aos humanos por utilizarem um tipo de coordenadas ao qual estamos mais habituados. Os três primeiros campos representam a distância em relação a origem que o ponto representado se encontra e os três últimos representam o nível de inclinação da TCP relativo a cada um dos planos – X, Y ou Z.

diretamente no *Teach Pendant*, o usuário não necessita se preocupar com configurações de cabeçalho, como a quantidade de variáveis usadas, pois estas são preenchidas automaticamente e nem sequer estão visíveis no *Teach Pendant*. Porém, quando realizada em um computador, é necessário a inclusão deste cabeçalho, como ilustrado na Figura 34.

2.2.2 Compiladores de Trajetórias

Para que ensaios de Manufatura Aditiva sejam viáveis no LABSOLDA utilizando o manipulador antropomórfico demonstrados nas seções anteriores foi necessário desenvolver um método de programação eficiente no qual *jobs* contendo sequência de movimentos que descrevem trajetórias desejadas fossem obtidas de forma ágil. Era essencial que o usuário, no caso um pesquisador vinculado ao laboratório, tivesse a liberdade de definir as dimensões e alterá-las facilmente entre um ensaio e outro.

Além disto, era necessário desenvolver alguma metodologia para extrair informações sobre a geometria de modelos *CAD* e utilizá-las como base para a geração das trajetórias.

O desenvolvimento destes dois tipos de compiladores de trajetórias será exibido a seguir.

2.2.2.1 Compilador de Trajetórias Interativo

O primeiro compilador desenvolvido foi o chamado “Compilador Interativo” no qual é o pesquisador que insere informações no software sobre a geometria da peça desejada. Além das informações sobre as dimensões da peça, o software requisita ao pesquisador dados como valores de incrementos, quantidade de camadas e velocidade de soldagem. O compilador utiliza todas estas informações para gerar um arquivo *.JBI* contendo todas as trajetórias resultantes. Comandos de espera (*timers*) e de disparo da fonte podem e devem ser incluídos de acordo com a necessidade.

O compilador foi inicialmente desenvolvido em linguagem *C++* e utilizou a interface do *MS-DOS* como meio de comunicação com o usuário. A primeira requisição que o software realiza ao pesquisador são informações sobre a geometria da peça que se deseja


```

====> PONTOS DEPOIS DE CONDICIONAR: <====
p[0][0]= 0 p[0][1]= 0 p[0][2]= 0 p[0][3]= 0 p[0][4]= 0
p[1][0]= 0 p[1][1]= 30000 p[1][2]= 0 p[1][3]= 0 p[1][4]= 0
p[2][0]= 10000 p[2][1]= 0 p[2][2]= 0 p[2][3]= 0 p[2][4]= 0
p[3][0]= 10000 p[3][1]= 30000 p[3][2]= 0 p[3][3]= 0 p[3][4]= 0
p[4][0]= 20000 p[4][1]= 0 p[4][2]= 0 p[4][3]= 0 p[4][4]= 0
p[5][0]= 20000 p[5][1]= 30000 p[5][2]= 0 p[5][3]= 0 p[5][4]= 0
p[6][0]= 30000 p[6][1]= 0 p[6][2]= 0 p[6][3]= 0 p[6][4]= 0
p[7][0]= 30000 p[7][1]= 30000 p[7][2]= 0 p[7][3]= 0 p[7][4]= 0
p[8][0]= 0 p[8][1]= 0 p[8][2]= 10000 p[8][3]= 0 p[8][4]= 0
p[9][0]= 0 p[9][1]= 30000 p[9][2]= 10000 p[9][3]= 0 p[9][4]= 0
p[10][0]= 10000 p[10][1]= 0 p[10][2]= 10000 p[10][3]= 0 p[10][4]= 0
p[11][0]= 10000 p[11][1]= 30000 p[11][2]= 10000 p[11][3]= 0 p[11][4]= 0
p[12][0]= 20000 p[12][1]= 0 p[12][2]= 10000 p[12][3]= 0 p[12][4]= 0
p[13][0]= 20000 p[13][1]= 30000 p[13][2]= 10000 p[13][3]= 0 p[13][4]= 0
p[14][0]= 30000 p[14][1]= 0 p[14][2]= 10000 p[14][3]= 0 p[14][4]= 0
p[15][0]= 30000 p[15][1]= 30000 p[15][2]= 10000 p[15][3]= 0 p[15][4]= 0

```

Figura 37: Pontos gerados relativos ao sólido projetado.

O sólido projetado é um paralelepípedo. Desta forma, há diversas maneiras que os pontos podem se conectar nas quais, se a deposição de material for realizada, o sólido será formado. O compilador analisa todas as informações inseridas pelo pesquisador e exibe as formas de deposição disponíveis. As formas de deposição disponíveis para o sólido deste exemplo estão exibidas na Figura 38.

```

ENTRE COM A FORMA DE DEPOSICAO DE MATERIAL:

1 - DEPOSICOES -
  ENTRE CORDOES: DIRECAO-->IGUAL, ARCO DESLIGANDO
  ENTRE ALTURAS: DIRECAO-->IGUAL, ARCO DESLIGANDO

2 - DEPOSICOES -
  ENTRE CORDOES: DIRECAO-->REVERSA, ARCO DESLIGANDO
  ENTRE ALTURAS: DIRECAO-->IGUAL, ARCO DESLIGANDO

3 - DEPOSICOES -
  ENTRE CORDOES: DIRECAO-->REVERSA, ARCO SEMPRE LIGADO
  ENTRE ALTURAS: DIRECAO-->IGUAL, ARCO DESLIGANDO

4 - DEPOSICOES -
  ENTRE CORDOES: DIRECAO-->REVERSA, ARCO SEMPRE LIGADO
  ENTRE ALTURAS: DIRECAO-->REVERSA A PARTIR DO INICIO, ARCO DESLIGANDO

5 - DEPOSICOES -
  ENTRE CORDOES: DIRECAO-->REVERSA, ARCO SEMPRE LIGADO
  ENTRE ALTURAS: DIRECAO-->REVERSA A PARTIR DO FIM, ARCO DESLIGANDO

6 - DEPOSICOES -
  ENTRE CORDOES: DIRECAO-->REVERSA, ARCO SEMPRE LIGADO
  ENTRE ALTURAS: DIRECAO-->REVERSA A PARTIR DO FIM, ARCO SEMPRE LIGADO

```

Figura 38: Formas de deposição possíveis para o sólido projetado

Como já citado em seções anteriores, as deposições são chamadas de Deposição Direta quando todos os cordões são depositados no mesmo sentido e são chamadas de Deposição Reversa quando os cordões são depositados em sentidos opostos. O mesmo

pode ser utilizado para cordões paralelos – Deposição Igual quando os cordões são depositados sempre no mesmo sentido e Deposição Reversa quando depositados em sentidos alternados, o que pode ser realizado sem que o arco seja extinto. Neste documento serão exibidas simulações para a **Forma 1** e para **Forma 6**.

Após a escolha do modo de deposição, o compilador criará um arquivo com extensão .JBI que contém o algoritmo que sincroniza a interpolação dos pontos projetados com os comandos de abertura e fechamento de arco de acordo com a forma de deposição desejada pelo pesquisador. Este algoritmo pode ser testado em um software de simulação da própria fabricante (*MotoSim*) para a identificação de possíveis erros antes da transferência para o manipulador real. Parte do algoritmo gerado, já carregado no software de simulação, é exibido na Figura 39:

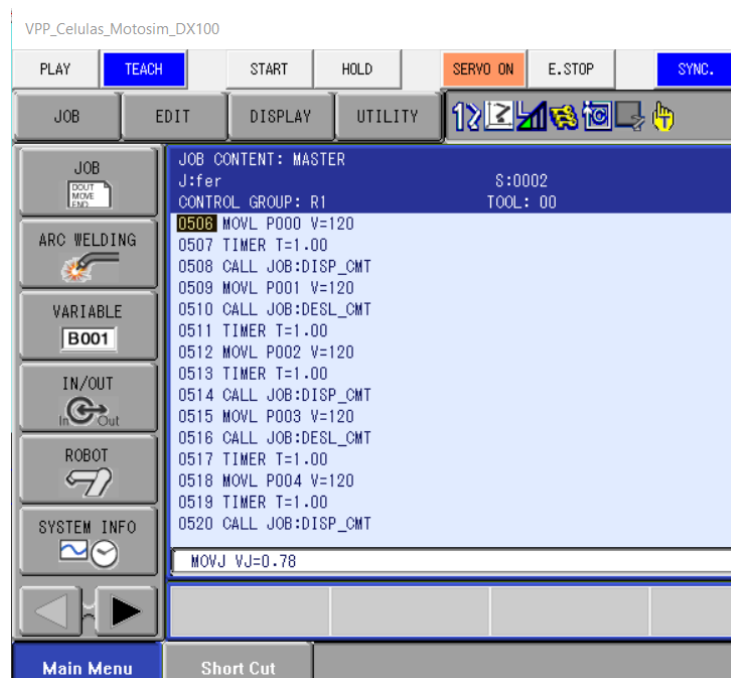


Figura 39: Visualização no software de simulação do algoritmo gerado.

A Figura 40 exibe a simulação das trajetórias geradas para criação do paralelepípedo utilizando a Forma 1 de deposição nas quais os cordões paralelos são todos depositados em Direção Igual. Ou seja, o arco se extingue a cada cordão depositado e é reaberto somente após o manipulador retornar ao ponto inicial do próximo cordão.

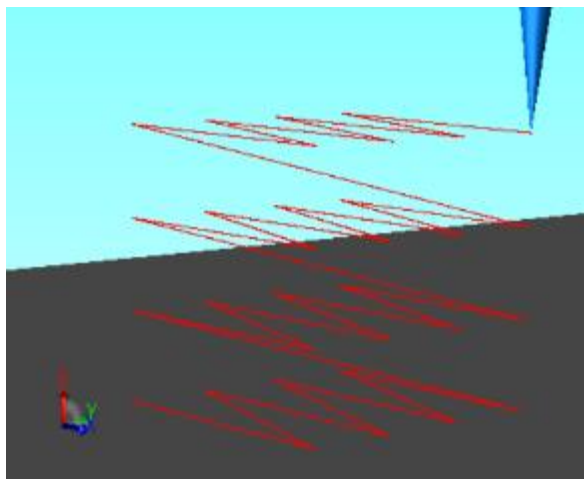


Figura 40: Simulação da **Forma 1** de deposição para manufatura de sólido tipo **Paralelepípedo**.

Na Figura 40, as trajetórias no plano XY paralelas ao eixo X são realizadas com arco aberto e, conseqüentemente, com deposição de material. Todas as demais são realizadas sem adição de material. Quando a deposição de uma camada completa é finalizada (quatro cordões, neste caso), a TCP é movimentada um incremento de altura acima do início da trajetória anterior e a deposição de uma nova camada é iniciada. Esta é a forma mais simples de deposição.

Já a **Forma 6** de deposição (Direção Reversa tanto para cordões quanto para camadas), ilustrada na Figura 41, descreve uma trajetória distinta ainda que utilizando os mesmos pontos projetados anteriormente. As trajetórias desta forma de deposição permitem que todo o sólido seja manufaturado sem que o arco seja extinto ao conectar o fim de uma camada com o início da camada seguinte.

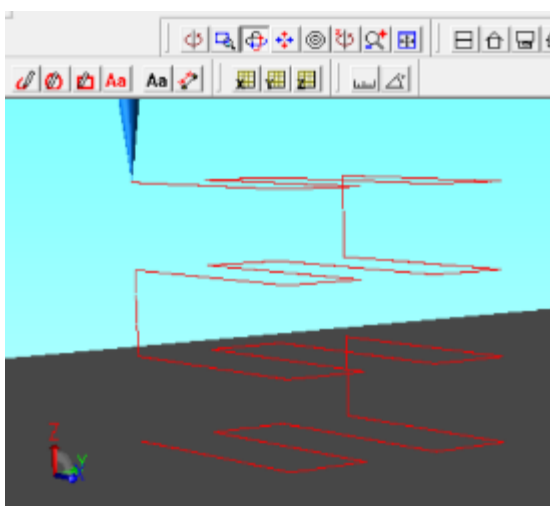


Figura 41: Simulação da **Forma 6** de deposição para manufatura de sólido tipo **Paralelepípedo**.

O desenvolvimento dos procedimentos para manufatura de **Paredes e Cilindros** foi realizado baseando-se nas mesmas ideias. A implementação em código destes algoritmos será omitida deste documento por questões de confidencialidade.

2.2.2.2 Compilador de Trajetórias Baseado em Arquivos CAD

CAD é a abreviação de *Computer Aided Design* que, em português, significa Desenho Assistido por Computador. Aqui, a palavra “assistir” está no sentido de “prestar auxílio ou assistência”. Ou seja, *CAD* se refere a ação de projetar sólidos utilizando um computador com todos seus recursos e capacidade de processamento. A utilização do computador revolucionou a forma com que sólidos eram projetados ao permitir que a velocidade de correção e reprodução aumentassem consideravelmente. Isso significou mais agilidade para realizar mudanças nos projetos e para reproduzir itens repetitivos.

Diferentemente do Compilador Interativo, tratado na seção anterior, o segundo compilador desenvolvido não exige que o pesquisador insira as dimensões do sólido desejado para que as trajetórias sejam geradas, mas exige que um arquivo *CAD* que represente o sólido em questão seja selecionado. O compilador, então, utiliza as informações do arquivo *CAD* para determinar as dimensões do sólido e, então, dar continuidade ao processo de geração das trajetórias.

Esta seção demonstra o desenvolvimento de um método no qual trajetórias para os manipuladores *Motoman* são geradas baseando-se em arquivos de programas *CAD*.

2.2.2.2.1 Software CAD – Solidworks

Solidworks é um software de *CAD* desenvolvido pela *Dassault Systèmes S.A.* e que funciona nos sistemas operacionais Windows. Baseia-se em computação paramétrica criando objetos tridimensionais a partir de formas geométricas elementares [26].

A escolha do *Solidworks* como software *CAD* para este projeto foi devido a sua alta popularidade e aceitação tanto na indústria quanto nas Universidades. Além disso, por ser um dos softwares *CAD* mais antigos no mercado oferece opções de trabalhar com uma vasta gama de extensões. Isto significa facilidade na conversão do mesmo sólido para diferentes extensões onde cada extensão utiliza uma forma de guardar as informações geométricas do sólido. A vantagem, na prática, é a possibilidade de encontrar alguma extensão na qual as informações do sólido podem ser extraídas de maneira prática.

Para construir um modelo (peça) em *Solidworks*, usualmente, inicia-se por um esboço (2D ou 3D) que é composto por geometrias como pontos, linhas, arcos, cônicas e *splines*. É no esboço que as dimensões são adicionadas para definir o tamanho e a

localização das geometrias. Este documento não irá abordar o projeto de modelos *CAD* de novas peças, mas, sim, como utilizar modelos já finalizados, usualmente projetados por terceiros, para extrair informações necessárias para a geração de movimentos e trajetórias.

Devido a assistência fornecida pelo computador, não é necessário que o projetista insira as coordenadas cartesianas sobre a geometria do sólido quando projetando-o em um software *CAD*. Na realidade, não é exigido ao projetista sequer ter conhecimento de alguma coordenada que esteja envolvida na representação do sólido que esteja sendo trabalhado.

Porém, na programação dos movimentos de manipuladores, o habitual é a utilização de coordenadas, tanto cartesianas quanto polares, para a delimitação do início e do fim de cada um dos movimentos utilizando as Variáveis de Posição tratadas na seção 2.1.1.1.1.1 desde documento. Em outras palavras, é necessário que, de alguma forma, o programador insira pontos no formato *X*, *Y* e *Z* que informem ao controlador do manipulador sobre os limites dos movimentos. Isto significa que, se for possível decompor um sólido em pontos, obter suas respectivas coordenadas e manipulá-los de forma coerente e eficiente, é possível utilizá-los para definir trajetórias que descrevam o sólido.

2.2.2.2.1.1 Decomposição do Modelo *CAD* em Pontos

Encontrar uma forma de decomposição de sólidos *CAD* em pontos cartesianos de uma forma que fosse possível extrair informações sobre suas coordenadas era uma necessidade para o desenvolvimento desta etapa do projeto. O uso do *Solidworks* era preferível devido a sua popularidade e após alguma pesquisa foi possível definir uma metodologia na qual métodos de elementos finitos são aplicadas ao sólido e as coordenadas de seus nós são extraídas.

Para que fosse possível a aplicação de malhas de elementos finitos em sólidos *CAD* utilizando o *Solidworks* foi necessária a instalação do pacote de extensão *Solidworks Simulation*. Este pacote de extensão oferece um ambiente para diversas simulações sofisticadas que incluem simulações estáticas, térmicas, de pressão, de fadiga, entre outras. Além disto, o algoritmo aplicado pelo software utiliza uma grande variedade de formas geométricas para maximizar a capacidade de representação do mundo real.

Após a instalação do pacote *Solidworks Simulation* e a abertura do modelo *CAD* desejado, deve-se clicar na aba “**Simulation**” e, em seguida, em “**Study → New Study**”,

localizados a esquerda da tela, como ilustrado na Figura 42. Em seguida, deve-se escolher “**Static Study**” devido ao fato da Aplicação de Elementos Finitos ser considerado um estudo estático, diferentemente de estudos de carga e de fadiga, por exemplo.

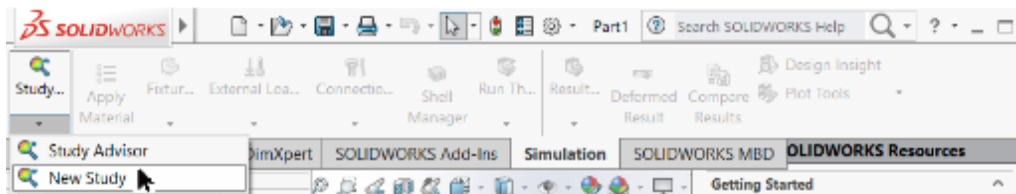


Figura 42: Aplicação de Métodos de Elementos Finitos no *Solidworks*.

Com isso, novas opções surgirão na barra lateral esquerda. Deve-se seleccionar o sólido como um todo ou somente as faces que se deseja aplicar o método de elementos finitos. Em seguida, deve-se clicar com o botão direito em “**Mesh**” e, em seguida, “**Create New Mesh**”, como ilustrado na Figura 43.

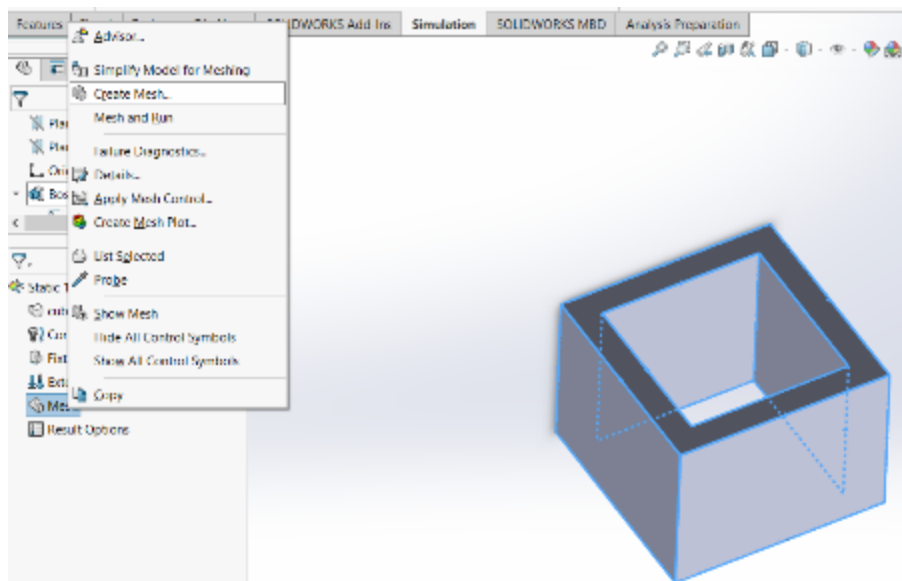


Figura 43: Criação da Malha de Elementos Finitos.

Parâmetros para a decomposição devem ser, agora, definidos sendo os mais importantes o “**Global Size**”, que é a dimensão de cada elemento finito, e o “**Tolerance**”, que é o tanto que as coordenadas dos elementos fornecidos pelas simulações podem se diferenciar das dimensões do modelo projetado. Habitua-se escolher 10mm como dimensão de cada elemento e 0.01mm de tolerância. Assim, o modelo será decomposto em uma malha de elementos finitos, como pode-se observar na Figura 44.

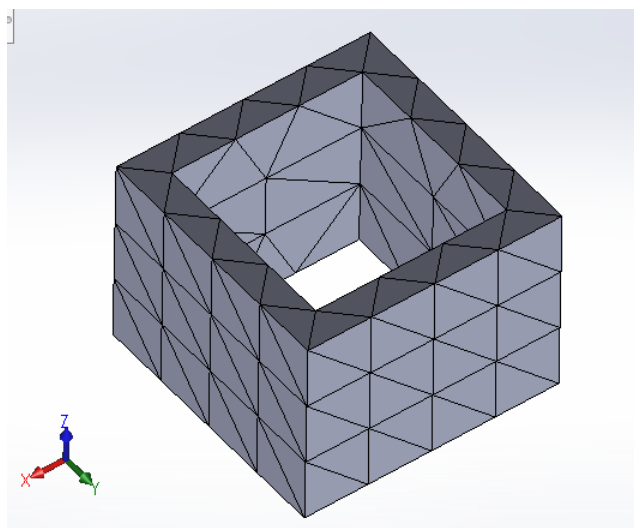


Figura 44: Modelo Decomposto em Malha de Elementos Finitos pelo *Solidworks*.

Agora, é necessário obter as coordenadas cartesianas das intersecções de cada elemento. Para isso, deve-se clicar com o botão direito do mouse, novamente, em **“Mesh”** e em seguida em **“Probe”** para, então, selecionar **“On selected entities”** e **“Node”**, como ilustrado na Figura 45. Somente agora, deve-se selecionar a peça como um todo, ou somente as faces ou arestas das quais se deseja obter as coordenadas, e clicar em **“Update”**.

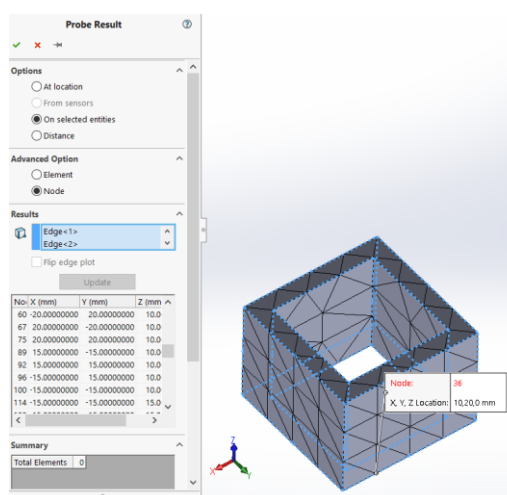
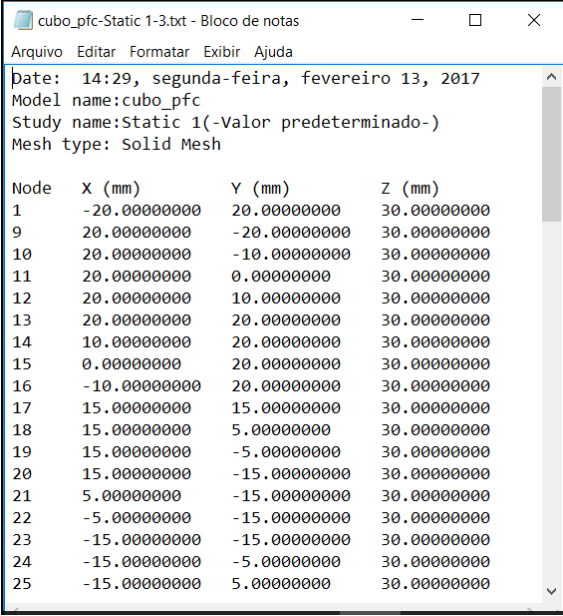


Figura 45: Obtenção das coordenadas dos nós da malha de elementos finito.

Assim, o *Solidworks* gerará uma lista contendo todos os pontos das entidades selecionadas e suas respectivas coordenadas que poderá ser salva em arquivo .txt ou .csv.

Na Figura 46 é ilustrado um arquivo salvo em .txt para o sólido que está sendo utilizado como exemplo nesta seção.



```

cubo_pfc-Static 1-3.txt - Bloco de notas
Arquivo Editar Formatar Exibir Ajuda
Date: 14:29, segunda-feira, fevereiro 13, 2017
Model name:cubo_pfc
Study name:Static 1(-Valor predeterminado-)
Mesh type: Solid Mesh

Node   X (mm)      Y (mm)      Z (mm)
1      -20.00000000  20.00000000  30.00000000
9       20.00000000 -20.00000000  30.00000000
10      20.00000000 -10.00000000  30.00000000
11      20.00000000  0.00000000  30.00000000
12      20.00000000 10.00000000  30.00000000
13      20.00000000 20.00000000  30.00000000
14      10.00000000 20.00000000  30.00000000
15      0.00000000  20.00000000  30.00000000
16     -10.00000000 20.00000000  30.00000000
17      15.00000000 15.00000000  30.00000000
18      15.00000000  5.00000000  30.00000000
19      15.00000000 -5.00000000  30.00000000
20      15.00000000 -15.00000000 30.00000000
21      5.00000000 -15.00000000 30.00000000
22     -5.00000000 -15.00000000 30.00000000
23     -15.00000000 -15.00000000 30.00000000
24     -15.00000000 -5.00000000  30.00000000
25     -15.00000000  5.00000000  30.00000000

```

Figura 46: Arquivo .txt gerado a partir do modelo do exemplo.

O arquivo gerado possui informações das três coordenadas de cada um dos nós da malha de elementos finitos. Porém, a lista segue uma ordem aleatória e nem todos os pontos são necessários para a geração das trajetórias, pois, por exemplo, para que um círculo seja executado são necessários quatro pontos e, para uma reta, somente dois.

Assim, o problema se resume, agora, em organizar, filtrar, identificar as *features* e gerar um programa na linguagem do controlador que execute as trajetórias correspondentes a peça.

2.2.2.2.1.2 *Projeção de Pontos em Contornos Seleccionadas*

O número de pontos gerados da decomposição de um sólido em coordenadas cartesianas, demonstrada na seção anterior, evidencia o grau de complexidade envolvido em operações de tratamento de pontos necessários para organizar e definir características de um sólido em um procedimento chamado de “**identificação de features**”.

Mas, muitas vezes, o tratamento de todos os pontos, projetados em todas as três dimensões, não é necessário para aplicações de Manufatura Aditiva. Muitas vezes, o tratamento dos pontos de somente uma face, e sua repetição ao longo das camadas, já é

o suficiente para a geração de trajetórias que representem sólidos satisfatoriamente. Esta forma de abordagem diminui o grau de complexidade das operações de tratamento de pontos consideravelmente.

Foi desenvolvido um segundo método de geração de trajetórias baseado em modelo CAD complementar ao exposto na seção anterior. Neste segundo método, o programa CAD utilizado ainda é o *Solidworks*, porém, desta vez, o método de elementos finitos não é aplicado ao sólido, mas, sim, pontos são projetados nos contornos da face de interesse. Em seguida, estes pontos são salvos em arquivo .IGES o qual o compilador desenvolvido utilizará para extrair informações da geometria desejada e projetar as trajetórias necessárias.

Para demonstração deste método, a confecção do “Cartão de Natal LABSOLDA 2017” foi utilizado como exemplo.

Um Papai Noel foi projetado pelo *designer* do laboratório utilizando o software *AutoCad* e os arquivos foram salvos com a extensão .DXF. Apesar desta não ser uma extensão oriunda do software *Solidworks*, este foi capaz de importar todas as informações dos arquivos e convertê-las para a extensão .SLDPRT, que é a extensão original do *Solidworks*. O Papai Noel projetado e aberto no *Solidworks*, já em formato .SLDPRT, pode ser visualizado na Figura 47.

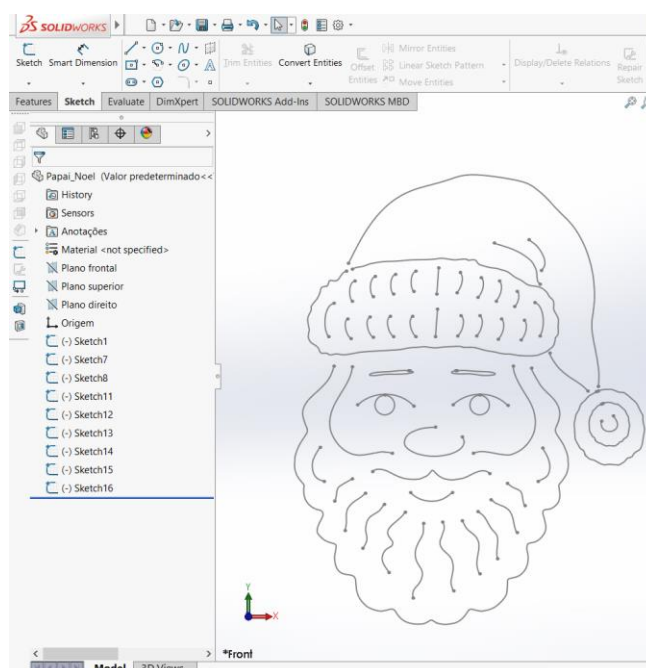


Figura 47: Desenho do Papai Noel aberto no *Solidworks*.

Agora, o desafio constitui em projetar pontos nos contornos que compõem o modelo e extrair as coordenadas destes pontos. Para isto, **Seleciona-se o Contorno** para o qual deseja-se criar a trajetória e, em seguida, cria-se pontos de referência sobre este clicando em **Reference Geometry**→**Point**. Em seguida, escolhe-se a opção **Evenly Distribute** para projetar a quantidade desejada de pontos igualmente espaçados entre si, como mostrado na Figura 48.

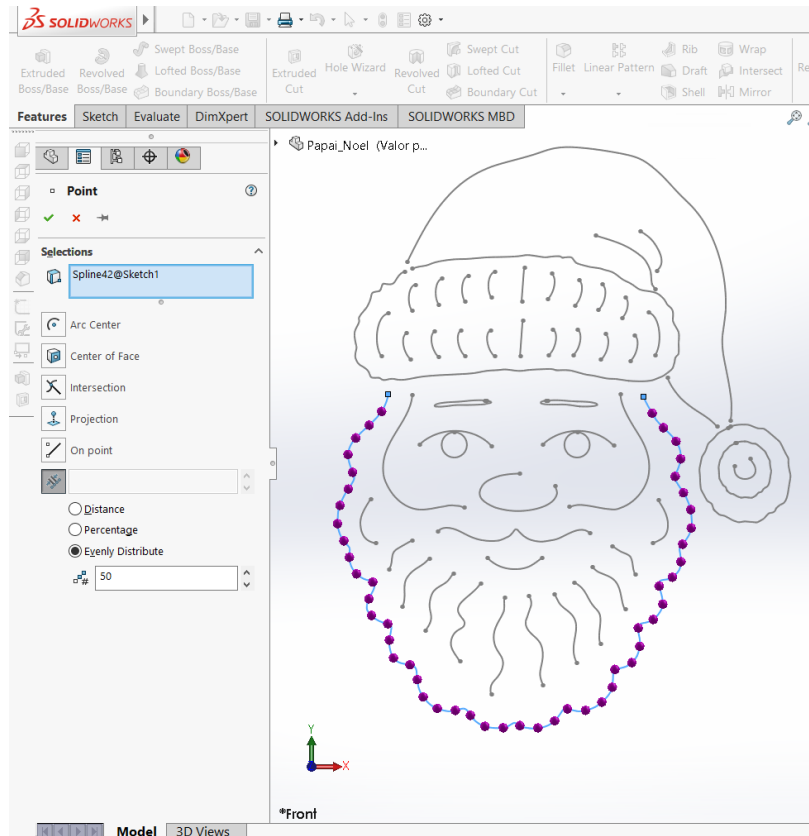


Figura 48: 50 pontos projetados igualmente espaçados entre si.

Quanto maior o número de pontos projetados sobre uma curva mais fielmente o manipulador irá reproduzir sua geometria, porém ao custo de maior probabilidade de o manipulador não desenvolver a velocidade configurada. Isto significa que quanto menor o número de pontos em uma trajetória mais fielmente o manipulador irá respeitar a velocidade configurada. Desta forma, encontrar a quantidade de pontos ideal para ao manipulador cumprir a trajetória satisfatoriamente depende da experiência do programador.

Após os pontos serem projetados, eles serão listados na barra de trabalho vertical à esquerda. Deve-se, então, **Criar um Novo Sketch**, **Selecionar os Pontos** na barra de trabalho citada e clicar em **Convert Entities** na aba **Sketch**. Desta forma, um novo esboço (*sketch*) será criado com pontos que coincidem com os Pontos de Referência que foram projetados sobre a curva. Assim, **Copia-se** este sketch (Ctrl+C), **Cria-se** um novo arquivo (Ctrl+N) e **Cola-se** o sketch copiado neste novo arquivo (Ctrl+V). Com isso, teremos um

arquivo .SLDPRT contendo somente os pontos que representam a curva sobre a qual estamos trabalhando, como mostrado na Figura 49:

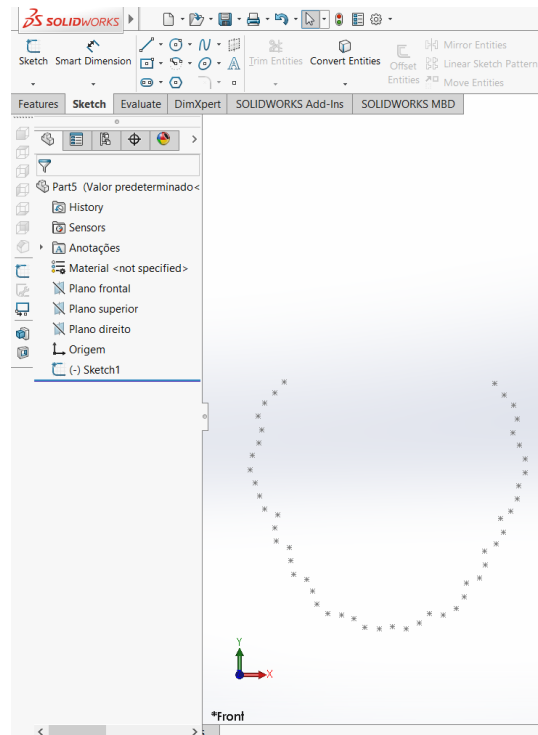


Figura 49: Arquivo contendo apenas pontos que representam a curva.

Apesar da extensão .SLDPRT ser a extensão padrão do *Solidworks*, o software é capaz de salvar os modelos criados em diversos formatos. Como já dito anteriormente, cada formato armazena as informações sobre a geometria do modelo de uma determinada maneira, entre as quais há extensões que facilitam a identificação das entidades presentes. Este é o caso do formato .IGES o qual utiliza um prefixo “116,” para representar anunciar pontos existentes no modelo.

Parte do arquivo acima, salvo em formato .IGES (**File→Save as→IGES→Options...→Export sketch entities→Ok→Save**), pode ser visualizado na Figura 50. Atentar para as linhas que iniciam com “116,” e seguem com três números separados por vírgulas – estas são linhas que indicam a presença de um ponto e as coordenadas cartesianas (X, Y e Z) do respectivo ponto.

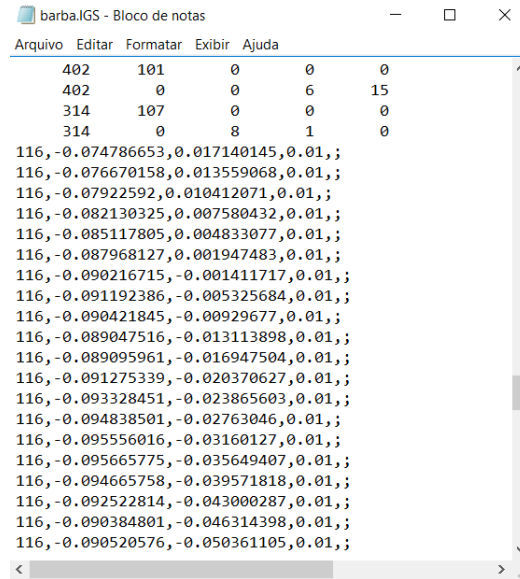


Figura 50: Parte de arquivo .IGES contendo pontos de uma curva do modelo

O arquivo .IGES gerado, mostrado acima, possui as coordenadas de todos os pontos que foram projetados no contorno selecionado e segundo compilador foi desenvolvido baseado nesta forma com que os arquivos .IGES armazenam os pontos existentes no modelo – o compilador realiza uma varredura no arquivo e, após localizar uma linha iniciada por “**116,**”, armazena os três números seguintes que são separados por vírgula como as coordenadas X, Y e Z do respectivo ponto. No caso da Figura 50, o primeiro ponto teria coordenadas **X = -74,5mm**, **Y = 17,1mm** e **Z = 10mm**. Os pontos são listados pela ordem de criação.

Agora, o problema se resume em escrever um *job* no qual os movimentos se baseiem nas coordenadas dos pontos listados e sejam sincronizados com comandos de abertura e fechamento de arco além de *timers* e outros comandos de sincronismo. Essa tarefa ficará a cargo do Compilador de Trajetórias desenvolvido.

2.3 Dissipação de Calor

Como já dito exaustivamente neste documento, Manufatura Aditiva é um processo do qual peças são obtidas próximas de suas dimensões finais. Isto significa que peças manufaturadas aditivamente, muitas vezes, necessitam passar por um processo de usinagem, isto quando não por outros possíveis processos, como o tratamento térmico.

A necessidade da aplicação da **usinagem** decorre do fato de as paredes manufaturadas utilizando processos de soldagem a arco e adição de arame possuírem aparência característica decorrente da deposição de cordões na qual os limites de cada camada são visíveis a olho nu. Processos de usinagem também serão aplicados quando às peças necessitarem de uma redução considerável de geometria par atender especificações de projeto. Ou seja, na prática, processos de usinagem acabam sendo aplicados à grande maioria das peças metálicas manufaturadas aditivamente via soldagem.

Usinagem compreende todo processo de fabricação que envolve remoção de material na busca de oferecer peças em formatos desejados. Dentre os quais podem ser citados o torneamento, a fresagem, a furação, a retifica e até o lixamento. Neste projeto, o torneamento recebe maior atenção devido ao fato de o compilador desenvolvido para este projeto fornece uma forma rápida de gerar trajetórias que resultam em superfícies de revolução, ideais para serem usinadas em um torno mecânico.

Em processos de torneamento, encontrar uma forma eficiente para fixar a peça à placa de castanhas do torno é sempre um grande desafio devido à dificuldade de centralização e de se criar suportes resistentes o suficiente. Na tentativa de facilitar esta tarefa, foi proposta a ideia de iniciar a manufatura de uma peça de revolução, utilizando alumínio, sobre a parede de um tubo, também de alumínio, que será chamado, neste documento, de **Tubo Base**. O tubo em questão, exibido na Figura 51, é fabricado por processo de extrusão e possui 1pol de diâmetro.



Figura 51: Tubo Base

O objetivo é utilizar a parede do Tubo Base como referência geométrica para a fabricação de uma peça de revolução e, posteriormente, utilizá-lo para fixar a peça à placa de castanhas do torno. Desta forma, deseja-se obter uma peça centralizada com um suporte de sacrifício unido metalurgicamente a ela. Assim, o processo de usinagem pode ocorrer em segurança e com o mínimo de remoção de material possível.

O compilador descrito nas seções anteriores utiliza coordenadas cartesianas para projetar as trajetórias necessárias para manufaturar o sólido desejado. No início do algoritmo, é requisitado ao usuário a marcação de um ponto no espaço que servirá como centro geométrico da peça projetada. Isto significa que o robô manufaturará a peça a partir deste ponto marcado e o oferece liberdade ao usuário para marcá-lo onde desejar. Desta forma, utilizou-se o Compilador Interativo, desenvolvido anteriormente neste projeto, para gerar trajetórias para manufaturar um cilindro com diâmetro inicial de 1pol e que varie ao longo de sua altura descrevendo a geometria da peça desejada. Logicamente, este valor (1pol) foi escolhido como diâmetro inicial da peça para coincidir com o diâmetro do tubo base, no qual algumas camadas do mesmo diâmetro serão depositadas antes que o diâmetro comece a aumentar.

O tubo foi fixado verticalmente e o ponto inicial foi marcado exatamente em seu centro geométrico, no centro do tubo, e na altura da face superior. Desta forma, os primeiros cordões foram depositados exatamente sobre a parede do tubo. Os parâmetros elétricos utilizados foram levantados na seção 2.1 deste documento e são os mesmos que vem sendo utilizado no desenvolvimento do projeto. Porém, os cordões depositados não se sustentaram e o Tubo Base fundiu logo no início do processo, como é possível observar na Figura 52.



Figura 52: Tubo Base fundido

Acreditou-se que o fato dos cordões não se sustentarem sobre o Tubo Base, mesmo que utilizando os parâmetros comumente empregados, se deveu a pobre dissipação de calor fornecida pela pouca massa do tubo quando comparada as chapas grossas de alumínio que foram utilizadas como base nos experimentos até então realizados. Desta forma, na tentativa de solucionar o problema encontrado, desenvolveu-se dispositivos de refrigeração que serão demonstrados nas seções a seguir.

2.3.1 Primeiro Dispositivo de Refrigeração

Como primeira tentativa de criar um dispositivo que melhorasse a dissipação de calor do processo foi utilizada uma bomba de água na qual é possível resfriar a água a temperaturas tão baixas quanto 4°C. Utilizou-se um tubo de cobre com diâmetro externo de 4mm e diâmetro interno de 1mm para envolver o tubo base formando uma serpentina, como ilustrado na Figura 53.



Figura 53: Serpentina entorno do Tubo Base

A pressão imposta pela bomba faz a água circular a uma vazão de 0,8 L/min no sentido de cima (mangueira azul) para baixo (mangueira vermelha) na intenção de para que a água mais fria entre próxima a fonte de calor em uma tentativa de otimizar o processo. No ensaio que se realizou, o sistema foi configurado para manter a temperatura da água em 4°C e os mesmos programas de trajetórias e parâmetros elétricos utilizados na tentativa anterior foram utilizados.

A Figura 54 exibe o resultado do ensaio realizado com o uso do Primeiro Dispositivo de Refrigeração. É possível observar que, apesar dos cordões não terem se sustentados como nos ensaios em chapa plana, o Tubo Base não se fundiu e uma peça se formou sobre sua borda. Isto significa que, apesar de a forma que os cordões escorreram não ser desejado, o dispositivo utilizado melhorou a dissipação de calor do sistema ao ponto de permitir a manufatura de uma peça.



Figura 54: Serpentina de Cobre envolvendo o Tubo Base

A forma com que os cordões escorreram, de certa forma, demonstra que o processo não está sob controle no sentido de não ser possível prever a geometria das paredes que serão formadas. O desejado é que os cordões se depositem de forma estável e constante do início ao fim do processo para que seja repetitivo e represente o que foi planejado na fase de projeto.

Mesmo que o processo não tenha se comportado como o esperado, usinou-se a peça obtida de acordo com o objetivo inicial – utilizar o tubo extrudado para fixação na placa de castanhas do torno mecânico. O processo de usinagem realizado na peça manufaturada pode ser visualizado na Figura 55:



Figura 55: Utilização do Tubo Base para Usinagem

A utilização do dispositivo de refrigeração demonstra que é possível melhorar a dissipação de calor utilizando uma bomba de água, mesmo que o nível de dissipação desejado não tenha sido atingido com o uso do primeiro dispositivo desenvolvido. Porém, fatos como a grande distância entre o fluido refrigerante e o Tubo Base neste dispositivo, além da existência de cobre entre eles, demonstraram que havia espaço para a criação de dispositivos mais eficientes.

2.3.2 Segundo Dispositivo de Refrigeração

No dispositivo de refrigeração desenvolvido na seção anterior, a água bombeada através da serpentina é a responsável pela melhora na eficiência da dissipação de calor do processo. Esta melhora de eficiência ocorre devido a constante renovação da massa presente nas regiões próximas a serpentina que ocorre devido a vazão de água. Em outras palavras, o que ocorre é que após um instante de troca de calor entre o Tubo Base e a massa presente ao seu redor, no instante seguinte uma porção desta massa existente ao redor do Tubo Base se renova por uma massa relativamente mais fria, o que gera a melhora na dissipação do calor.

A transferência de calor que ocorre no dispositivo desenvolvido na seção anterior ocorre quase que inteiramente por convecção, no sentido de que o calor é transferido do Tubo Base para o cobre antes de ser transferido para água que é renovada. Na prática, isto significa que a existência do cobre entre o Tubo Base e o fluxo de água piora a eficiência da dissipação de calor do sistema.

Como tentativa de desenvolver um dispositivo que fornecesse uma maior dissipação de calor, decidiu-se utilizar uma estratégia na qual a água refrigerada entrasse em contato direto com o Tubo Base dispensando o uso da serpentina de cobre. Para isto, usinou-se três câmaras em um cilindro de nylon – duas para a acomodação de o’rings e uma para o fluxo de água. Por fim, acoplou-se uma conexão para entrada e outra para a saída de água. A peça finalizada pode ser visualizada na Figura 56.



Figura 56: Setup do Segundo Dispositivo de Refrigeração

Preocupou-se em manter reduzidas as dimensões da câmara pela qual o fluxo de água circulará para manter elevada a taxa de renovação de massa, pois quanto mais rápido a massa se renovar mais eficiente será a transferência de calor. Como a bomba de pressão utilizada fornece uma pressão constante, uma maior taxa de renovação de massa é atingida ao reduzir a câmara de circulação de água devido ao fato disto gerar um aumento na velocidade de circulação do fluido.

A câmara interna possui 26.5mm de comprimento com diâmetro interno 4mm maior do que o diâmetro externo do Tubo Base, ou seja, 30.4mm. Dessa forma, a água flui por uma câmara de 5807mm³ a uma vazão de 2.4L/min com a bomba de pressão utilizada. Tomou-se o cuidado em manter reduzidas as dimensões das espessuras das paredes do alojamento do *o’ring* superior para que o fluido refrigerante se aproximasse ao máximo da fonte de calor. Tomou-se o cuidado, também, em projetar os canais de alojamento dos *o’rings* de acordo com dimensões fornecidas pelo fabricante. Os *plugs* para entrada e saída do fluxo de água foram posicionados no ponto médio do comprimento da câmara interna.



Figura 57: Segundo Dispositivo de Refrigeração

Com o setup escolhido, a água refrigerada a 4°C, bombeada pelo sistema de bombeamento, colide fisicamente com o Tubo Base gerando um escoamento turbulento no qual ocorre uma grande troca de calor entre o Tubo Base e o fluido refrigerante. Como o volume da câmara de circulação é pequeno, todo o seu volume é renovado rapidamente e uma troca de calor eficiente se sucede. As acomodações para os dois *o'rings* de vedação são fixas na busca de impedir a livre movimentação destes e assim evitar a variação do volume interno do dispositivo a cada ensaio.

Mais uma vez, o ensaio da manufatura de um sólido sobre a borda de um tubo foi realizado utilizando os mesmos parâmetros e configurações que nos dois primeiros ensaios. Porém, agora, o Segundo Dispositivo de Refrigeração foi utilizado. Com esse novo sistema de refrigeração os cordões não escorreram e foi possível obter uma transferência metálica estável, como demonstrado na Figura 58.



Figura 58: Peça com Transferência Metálica Estável e Sistema de Refrigeração

O experimento realizado com o Segundo Dispositivo de Refrigeração demonstra que o nível de dissipação de calor atingido com este dispositivo foi suficiente para manter a deposição de cordões estável e evitar que os cordões escorressem. Como a molhabilidade dos cordões diminuiu consideravelmente e os parâmetros de soldagem se mantiveram inalterados, os cordões depositados tenderam a ficar mais altos. Devido a esta mudança na geometria dos cordões o processo precisou ser interrompido após algumas camadas depositadas devido a aproximação demasiada da peça a tocha. Na Figura 59 é possível observar, em detalhes, três camadas depositadas com o mesmo diâmetro do Tubo Base e outras camadas nas quais o diâmetro aumenta constantemente.



Figura 59: Peça com Transferência Metálica Estável

A peça obtida, ilustrada acima, passou por processo de usinagem da mesma forma que a peça obtida na seção 2.3.1. Porém, desta vez, a quantidade de material retirada foi somente a suficiente para que as linhas que delimitam as camadas desaparecessem reduzindo a parede da peça a sua espessura efetiva. Na Figura 60 é possível observar a peça após o processo de usinagem.



Figura 60: Peça usinada

Como dito anteriormente, com a utilização deste dispositivo de refrigeração o ensaio precisou ser interrompido para evitar a colisão da peça com a tocha. Isto foi devido ao fato de os cordões depositados possuírem altura maior do que os incrementos configurados a priori nas trajetórias utilizadas. Esta relação de Temperatura do Processo X Altura dos Cordões já é bem conhecida e consolidada no campo da soldagem. Porém, quando a soldagem começa a ser aplicada em processos de Manufatura Aditiva surge a necessidade do desenvolvimento de formas mais eficientes para determinação dos incrementos necessários no eixo altura. O desenvolvimento que será demonstrado na próxima seção tem como objetivo a solução deste problema.

2.4 Estimativa das Alturas dos Cordões

Os primeiros Compiladores de Trajetórias desenvolvidos neste projeto utilizavam informações fornecidas pelo usuário para gerar trajetórias destinadas a Manufatura Aditiva de peças metálicas via Soldagem a Arco+Arame. O valor do “Incremento em Z” que deve ser executado pelo compilador após a deposição de cada uma das camadas é uma das informações requisita pelos compiladores antes que o algoritmo seja gerado. Isto exige que uma estimativa da altura de cada cordão seja realizada a priori pelo usuário. Porém, realizar esta estimativa com o grau de precisão necessário é um desafio que pode se demonstrar extremamente ineficiente.

Na soldagem a arco, a geometria resultante dos cordões depositados é influenciada por muitas variáveis que podem compreender desde os **Parâmetros Elétricos** configurados na fonte, passando pelos **Parâmetros de Trajetórias** como, por exemplo, a Velocidade de Soldagem e a Intensidade dos Incrementos Horizontais escolhidos pelo usuário e chegando até a **Variáveis Físicas** do processo como a Temperatura Inicial da Peça e Capacidade de Dissipação de Calor do sistema. A soma destas com mais uma série de outras variáveis irá definir não só a geometria de cada um dos cordões como também irá influenciar as características metalúrgicas da peça final.

A estimativa da altura média dos cordões pode ser realizada utilizando Modelos Fenomenológicos, os quais buscam descrever os principais fenômenos envolvidos no processo de soldagem utilizando-se de equações que representam os princípios básicos de conservação de massa, de energia e da quantidade de movimento. A estimativa da altura pode, também, ser realizada utilizando Modelos Empíricos, nos quais o processo é visto como uma “caixa-preta” e funções de transferência são utilizadas para representar os mecanismos de causa/efeito entre as variáveis independentes e as variáveis dependentes do processo [27]. Muitas vezes, estas equações se tornam complexas demais e não representam a realidade suficientemente bem devido a diversos fatores como não

idealidades e dificuldades na mensuração de determinadas grandezas. Na prática, o “método da Tentativa e Erro” acaba sendo o utilizado o que torna o procedimento caro e ineficiente chegando a prejudicar a produtividade.

De toda forma, mesmo que um valor ótimo de incremento na direção da altura seja encontrado em um determinado dia para uma determinada combinação de parâmetros, dificilmente este mesmo valor será o ótimo em dias e em ensaios subsequentes devido a diversas alterações que podem ocorrer nas condições do processo. Em outras palavras, o valor da altura dos cordões é muito sensível a variações no processo fazendo com que um erro sempre esteja presente nas estimativas realizadas. Este erro se acumulará rapidamente durante as deposições fazendo com que a DBCP originalmente escolhida se altere tanto para um valor menor quanto para um valor maior do que o desejado pelo usuário pesquisador, sendo ambos os casos prejudiciais ao processo.

Em processos MIG/MAG convencionais, a fonte geralmente utilizada é de tensão o que significa que a fonte irá impor e manterá um determinado valor de tensão ao processo. A corrente resultante será decorrente da relação desta tensão imposta pela fonte com a impedância total do circuito. Além disto, o fato da fonte ser de tensão faz com que o comprimento do arco se mantenha constante e mudanças na DBCP irá resultar em alterações no comprimento do *stick out* do processo - comprimento de arame presente entre o Bico de Contato e o Arco.

O aumento do *stick out* influencia diretamente na geometria do cordão de solda, uma vez que reduz a intensidade da corrente. Menor corrente significa menor ação dos campos magnéticos e menor pressão sobre a poça de fusão. O mecanismo que representa as gotas impingindo sobre o metal de base com massa e velocidade determinada (momentum) também é alterado. A velocidade de chegada das gotas é função da corrente de soldagem. Essers e Walter verificaram em experimentos que com a redução da corrente, a massa da gota aumenta. Porém, tanto sua frequência de transferência quanto sua velocidade no instante do impacto decrescem. Consequentemente, também contribuem para a diminuição do nível de penetração. Resultados apresentados por Kim e Na comprovam o fato descrito mediante ensaios variando-se a DBCP [21].

Outros aspectos que influenciam a altura dos cordões estão relacionados ao aporte térmico. Se o aporte térmico é alterado por algum motivo, como, por exemplo, o acúmulo de calor na peça devido a pobre dissipação de calor do sistema e/ou pausas para resfriamento muito curtas, a geometria das deposições também pode ser alterada – se o cordão possuir maior molhabilidade sua altura diminuirá e vice-versa. A importância desta relação pode ser observada na Figura 61 na qual são exibidos resultados da manufatura aditiva de duas paredes nas quais foram utilizados exatamente os mesmos parâmetros elétricos e de trajetórias, porém, na parede da direita, foi imposto um tempo de resfriamento de 60 segundos entre a deposição de cordões subsequentes.



Figura 61: Influência do tempo de resfriamento entre deposições.

Como é possível observar na Figura 61, a parede da esquerda, na qual o tempo de resfriamento não foi utilizado, obteve uma geometria muito diferente da parede da direita que foi manufacturada com tempo de resfriamento entre as deposições. Este efeito é explicado pelo o que foi exposto acima relacionado ao acúmulo de calor na peça que faz com que os cordões adquiram maior largura e menor altura, chegando ao ponto de a parede obter uma geometria totalmente desuniforme pela alteração da molhabilidade ao longo do cordão. Porém, aqui, o que deve ser destacado não é somente o fato da parede da direita ter obtido uma geometria mais uniforme, mas, sim, o fato de que o Incremento em Z utilizado foi o suficiente para manufacturar a parede da esquerda, mas a manufactura da parede da direita necessitou ser interrompida após a deposição de apenas 14 dos 20 cordões programados devido ao choque da peça com a tocha.

O desafio relacionado a manter DBCP em um valor constante também se manifesta ao se manufacturar peças que sofrem alterações em seus diâmetros, rotações em torno de seu eixo ou deslocamento do centro. O desafio é devido ao fato de que o manipulador, ao realizar estas operações citadas, não depositará um cordão exatamente sobre o outro, mas, sim, um tanto desalinhado com o cordão precedente. Isto faz com que a altura resultante das deposições realizadas em alguma destas formas seja menor do que quando depositados exatamente um sobre o outro. A Figura 62 demonstra o efeito da perda da proteção gasosa devido ao aumento excessivo da DBCP na manufactura de uma peça que possui ao longo de sua altura efeitos como aumento de diâmetro, rotação e deslocamento do centro.



Figura 62: Efeito da perda da proteção gasosa devido ao aumento excessivo da DBCP.

De acordo com os resultados expostos acima, ficou evidente a necessidade do desenvolvimento de uma estratégia de controle que mantivesse a DBCP constante no valor escolhido pelo usuário pesquisador. Desta forma, foi proposta a utilização de um sensor laser para realizar a leitura dos cordões depositados para que, então, de acordo com os valores lidos, determinar a altura do cordão depositado e utilizar este valor para realizar o incremento do manipulador na direção da altura.

2.4.1 Sensor Laser *Meta Vision Systems*

A empresa *Meta* foi formada em 1984 como uma *spin out* de um projeto de pesquisa em engenharia na mundialmente conhecida Universidade de Oxford. O objetivo principal do projeto era desenvolver um robô de soldagem guiado por um sensor laser e gerou a primeira patente da empresa. Desde então, a empresa cresceu se tornando a primeira a aplicar técnicas de soldagem adaptativa e desenvolvendo diversos projetos de sucesso para empresas como *Caterpillar*, *Lincoln Electric*, empresas da área aeroespacial, nuclear, entre outras. Hoje, a empresa *Meta* é formada por mais de 40 colaboradores e já forneceu mais de 3000 sensores lasers e continua a desenvolver novas soluções para todos os tipos de aplicações de soldagem a arco [28].

O LABSOLDA possui três sensores *Meta Vision* sendo dois voltados para soldagem externa e um voltado para soldagem interna de tubos. Apesar da construção física e da distância focal serem diferentes (50mm para o de soldagem externa e 25mm para o de soldagem interna), o funcionamento e a forma de comunicação dos dois modelos são idênticos.

A empresa fornece um software com interface amigável no qual se deve selecionar uma entre muitos padrões de juntas disponíveis. Esta seleção informa ao sistema qual tipo de junta está sendo monitorada e, desta forma, filtros desenvolvidos pelo próprio fabricante são aplicados e informações como, por exemplo, o centro da junta são extraídas e fornecidas ao usuário.

Porém, apesar de diversas, a quantidade de juntas disponíveis pelo fabricante são limitadas e muitas vezes não há alguma opção disponível para aplicações não muito usuais, como é o caso do projeto descrito neste documento no qual é necessário a leitura da altura de um cordão de solda. Levando este fato em consideração, o fabricante fornece um arquivo .DLL que, quando utilizado juntamente com algoritmos desenvolvidos em alguma linguagem de programação, podem realizar a comunicação com o sensor e extrair informações necessárias.

2.4.2 Desenvolvimento de Interface Dedicada

Como dito acima, o software fornecido pelo fabricante possui opções de se trabalhar com diversos tipos de juntas, porém, nenhuma das opções é apropriada para desenvolver o controle proposto neste projeto. Para isto, foi necessário desenvolver uma nova interface na qual o arquivo .DLL fornecido pelo fabricante é usado para estabelecer comunicação com o sensor.

O arquivo .DLL possui em seu código fonte comando pré-estabelecidos para tratar mensagens que são enviadas e recebidas do sensor. O fabricante definiu a utilização do **Protocolo UDP** para a realização destas tarefas, pois se tratar de um protocolo de alta velocidade por não possuir rotinas de confirmação de recebimento de pacotes, diferentemente do Protocolo TCP/IP. O Protocolo UDP é o mais apropriado para ser utilizado em aplicações em que muitos dados devem ser transmitidos em alta velocidade e não existir grandes problemas na perda de alguns pacotes. Para aplicações como a desenvolvida neste projeto, a velocidade de envio e recebimento de informações possui prioridade sobre a garantia de entrega. Os conceitos sobre Conexão UDP, que são expostos na disciplina de Redes do curso de Engenharia de Controle e Automação da UFSC, foram revistos e aplicados no desenvolvimento deste projeto.

É necessário a utilização de alguma linguagem de programação para manipular o arquivo .DLL fornecido pelo fabricante e também para criar uma interface para interação com o usuário pesquisador. Desta forma, foi utilizada a linguagem C#, desenvolvida pela Microsoft, por ser uma linguagem conveniente para criação de softwares baseados em janelas ao estilo que estamos acostumados no sistema operacional *Windows*. Esta foi uma oportunidade para satisfazer o desejo do autor deste projeto em adquirir conhecimentos em uma linguagem de programação que vem sendo cada vez mais usada. Todos os trechos de códigos fornecidos pelo fabricante foram estudados e compreendidos de tal forma que foi possível identificar quais métodos eram realmente necessários para o desenvolvimento deste projeto. Desta forma, o algoritmo desenvolvido neste projeto acabou por se tornar muito mais leve do que o original favorecendo um melhor desempenho durante os ensaios.

A interface para este projeto foi desenvolvida utilizando o **Microsoft Visual Studio**, que é um pacote de programas da Microsoft para desenvolvimento de software especialmente dedicado ao .NET Framework e às linguagens Visual Basic (VB), C, C++, C# (C Sharp) e J# (J Sharp). Especificamente neste projeto, a linguagem C# foi a utilizada e a interface desenvolvida pode ser visualizada na Figura 63. Os códigos implementados não serão expostos neste documento por questões de confidencialidade.

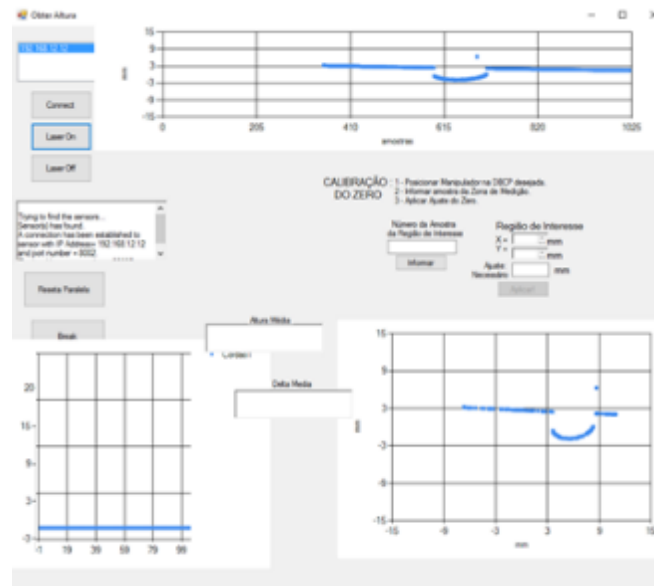


Figura 63: Interface do software desenvolvido para controle da DBCP.

A interface, ilustrada na Figura 63, foi desenvolvida de forma que funções como *Conectar ao Sensor*, *Ligar Laser*, *Desligar Laser* e *Calibração do Zero* estão disponíveis para o usuário pesquisador. As **leituras** do sensor **em tempo real** são exibidas nos dois gráficos à direita, onde o gráfico superior representa os dados sem tratamento e o inferior representa os dados tratados. Já o gráfico à esquerda da interface representa o **histórico dos valores do ponto mais alto** de cada uma das leituras realizadas no ensaio, ou seja, este gráfico exhibe o histórico dos valores dos pontos mais próximos do sensor. Mais adiante, neste documento, ficará claro para o leitor que as informações mais relevantes para realizar o controle da Distância Bico de Contato-Peça se encontram no valor destes pontos mais altos.

2.4.3 Determinação da Faixa de Medição

Como já dito nesta seção, o software fornecido pelo fabricante para a interação com o sensor laser não está sendo usado no desenvolvimento deste projeto por oferecer suporte somente para tratar dados de leituras de juntas pré-estabelecidas e nenhuma opção para tratar dados de leituras da altura de cordões. Desta forma, foi necessário desenvolver métodos para o tratamento das leituras realizadas e enviadas pelo sensor laser.

Para realizar os primeiros desenvolvimentos como, por exemplo, rotinas de conexão com o sensor laser e visualização das primeiras aquisições, uma bancada foi montada de acordo com a Figura 64.



Figura 64: Corpo de Prova e Setup para Ensaios de Bancada.

Na bancada, é possível visualizar a Fonte de Alimentação (1), a Placa de Controle (2), o Cabeçote Laser (3), o Computador (4) utilizado como interface de usuário e o Corpo de Prova (5) utilizado como modelo. O Computador se conecta a Placa de Controle via Ethernet e o modelo do Cabeçote Laser utilizado na bancada foi o *SLS 25 H1* da *Meta Vision*.

Os Sensores Lasers possuem faixas determinadas de trabalho. O modelo utilizado para os ensaios de bancada desta seção foi o *SLS 25 H1*, da fabricante *Meta Vision*, que possui distância focal ideal sensor-peça de **25mm**, fazendo com que os objetos que se encontram a esta distância do sensor sejam representados nas coordenadas de valor 0 no eixo vertical do gráfico, como o topo do cordão na aquisição abaixo:

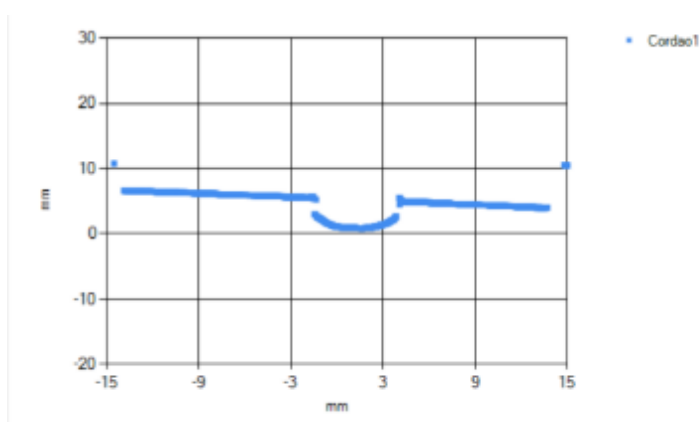


Figura 65: Leitura obtida com o topo do cordão à 25mm do Sensor.

Como os objetos localizados a 25mm do sensor são representados como valor 0, os objetos localizados a uma distância maior serão representados por números positivos e os objetos localizados a uma distância menor são representados por números negativos. Logicamente, esta é somente uma forma de representação que pode ser alterada via software fazendo com que, por exemplo, os valores 0 sejam representados pelo valor 25mm ou qualquer outra forma desejada pelo desenvolvedor. Isto é conseguido somando ou multiplicando constantes aos valores obtidos das leituras.

Sensores lasers possuem faixas de medição bem definidas. Isto significa que os objetos de interesse devem estar localizados entre valores mínimos e máximos para que as medições sejam condizentes. Estas faixas de medição existem devido a características construtivas destes sensores os quais utilizam uma câmera para capturar o feixe laser projetado sobre o objeto. A correta determinação desta faixa de medição, específica para cada modelo de sensor laser, é de suma importância para o desenvolvimento deste projeto, pois deve ser levada em consideração ao fixar o sensor a tocha. É possível determinar as distâncias máxima e mínima das quais boas medições podem ser adquiridas variando a distância *sensor-peça*, como ilustrado na Figura 66:

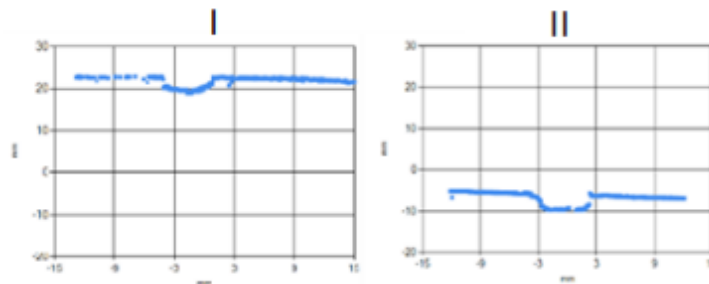


Figura 66: Distância *sensor-peça* máxima e mínima para uma aquisição condizente.

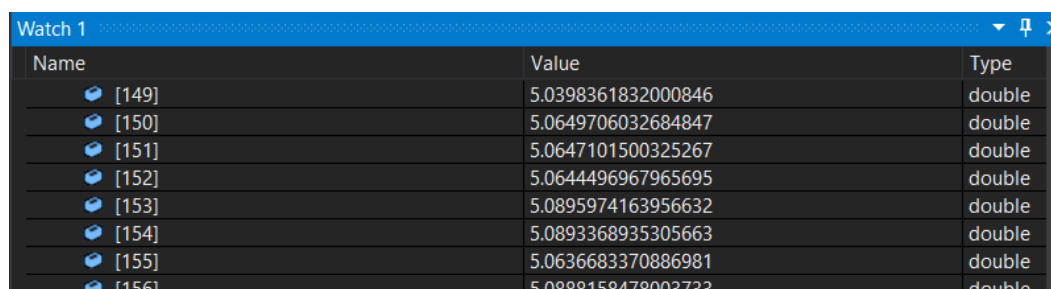
Na Figura 66, é possível observar que os pontos projetados no gráfico demonstram uma aparência de início de distorção. Isto significa que, em ambos os casos, o cordão sobre o qual o feixe laser está sendo projetado está no limite, sendo que no caso (I) o cordão se encontra no limite máximo (48mm) e no caso (II) o cordão se encontra no limite mínimo (15mm), considerando que o valor 0 (zero) do eixo das ordenadas corresponde a um distância *sensor-peça* de 25mm. Desta forma, o sensor laser deve ser fixado a tocha de tal maneira que as leituras sejam realizadas sempre dentro desta faixa de distância – de 15 a 45mm.

2.4.4 Tratamento dos Dados

Os dados fornecidos pelo sensor devem ser tratados de modo a facilitar a determinação dos pontos mais próximos ao sensor que, juntos, formam a região de interesse nesse projeto, pois representam a região mais alta dos cordões depositados.

Cada leitura realizada pelo sensor laser utilizado neste projeto fornece um conjunto de 1024 pontos. Cada um destes pontos é vinculado a duas informações, sendo que uma representa a posição na direção horizontal e outra a posição na direção vertical do ponto em questão. O valor que representa a posição na direção horizontal é relativo ao comprimento do feixe laser e pode variar entre -15 e +15mm, definindo uma faixa de leitura de 30mm sendo o valor 0mm relativo a metade do feixe. Já o valor que representa a posição do ponto na direção vertical é relativo à altura do ponto e pode variar entre 23 e -10mm, correspondendo a faixa de medição introduzida na seção anterior.

Cada um destes valores relativos a cada um dos pontos possuem 16 casas decimais, como ilustrado na Figura 67 que demonstra alguns dos 1024 pontos relativos às coordenadas de uma leitura:



Name	Value	Type
[149]	5.0398361832000846	double
[150]	5.0649706032684847	double
[151]	5.0647101500325267	double
[152]	5.0644496967965695	double
[153]	5.0895974163956632	double
[154]	5.0893368935305663	double
[155]	5.0636683370886981	double
[156]	5.0888158478003733	double

Figura 67: Dados de Leitura fornecidos pelo Sensor – Eixo das Coordenadas.

A utilização de tantas casas decimais não é necessária e chega a ser até indesejável em determinadas situações. Dessa forma, o primeiro tratamento realizado nos dados recebidos é o arredondamento a duas casas decimais, que resulta em dados como os ilustrados abaixo:

Name	Value	Type
[29]	11.41	double
[30]	11.53	double
[31]	11.5	double
[32]	11.44	double
[33]	11.47	double
[34]	11.47	double
[35]	11.47	double
[36]	11.47	double

Figura 68: Dados arredondados a duas casas decimais.

Com os dados arredondados a duas casas decimais, observamos que muitos pontos consecutivos se tornam repetidos. Há um custo computacional para processar qualquer dado de algum ponto, mas o processamento dos dados destes pontos repetidos não gera ganho de informação algum. Desta forma, um segundo tratamento realizado é a eliminação destes pontos repetidos para tornar a nuvem de pontos menor e mais leve.

Com a eliminação dos pontos consecutivos repetidos, o número de pontos de uma leitura realizada se reduz dos 1024 originais para menos do que 500, como demonstrado na Figura 69:

Name	Value
listyf	Count = 480
listy	Count = 1023

Figura 69: Quantidade de Pontos por Leitura: listyf → dados filtrados, listy → dados não-filtrados.

Com a intenção de eliminar ainda mais os dados desnecessários e considerando que a região de interesse se encontra sempre próxima ao centro da leitura, foi realizado um “janelamento” no vetor de pontos para eliminar os dados mais afastados do centro da leitura e conseqüentemente desnecessários. Tal tratamento de dados faz com que o sistema de controle “feche o foco” na região de interesse e não gaste tempo de processamento com informações desnecessárias.

Desta forma, com os tratamentos de dados descritos acima, em uma leitura aleatória realizada, os dados se reduziram dos 1024 pontos originais para menos de 300 sem perda de informação considerável, como observado nos gráficos exibidos na Figura 70:

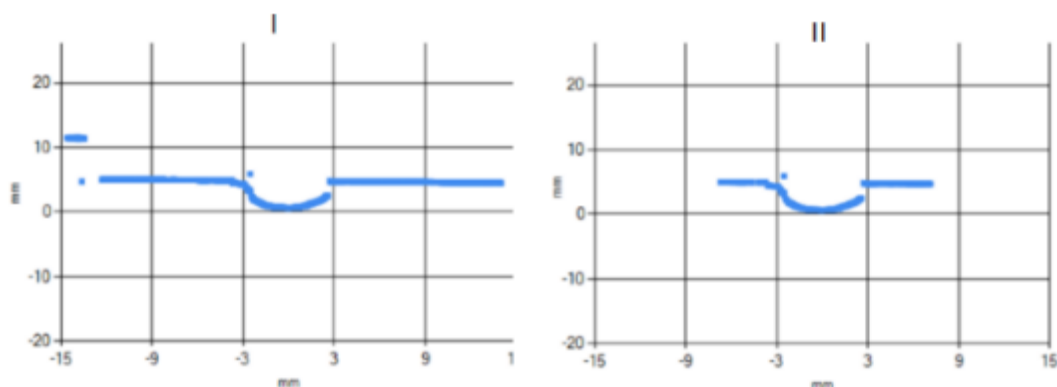


Figura 70: 1024 Pontos sem Tratamento (I), 249 Pontos pós-tratamento (II)

Mesmo com os tratamentos dos dados demonstrados nesta seção é necessário, ainda, realizar calibrações para que os valores fornecidos pelo sensor laser reflitam a realidade. Estas calibrações são necessárias devido a inclinação do laser em relação ao plano em que o feixe está sendo projetado.

2.4.5 Calibração do Zero e Levantamento da Reta de Tendência

Como dito anteriormente, algumas calibrações são necessárias para que as informações fornecidas pelo laser sejam condizentes com a realidade. Esta calibração é tipicamente chamada de **Levantamento da Reta de Tendência**.

O Levantamento da Reta de Tendência é necessária devido a inclinação do sensor laser em relação ao plano em que o feixe está sendo projetado. Esta calibração não seria necessária caso o sensor laser estivesse perfeitamente perpendicular ao plano de interesse. Além de ser praticamente impossível, esta situação (sensor laser perpendicular ao plano de interesse) não é desejada neste projeto, pois o feixe seria projetado muito distante da TCP (Tool Center Point) e muita informação seria perdida.

O Levantamento da Reta de Tendência deve ser realizada no ponto de operação do processo a ser controlado, ou seja, antes de realizar este levantamento o sensor laser deve ser fixado no ângulo desejado e a tocha deve ser posicionada sobre o plano com a DBCP (Distância Bico de Contato-Peça) desejada. Porém, antes da realização do Levantamento da Reta de Tendência, é conveniente realizar a **Calibração do Zero** no ponto de operação do processo.

A Calibração do Zero foi adotada no desenvolvimento deste projeto como forma de facilitar o desenvolvimento de uma estratégia de controle eficiente para o desafio proposto. Ao posicionar a tocha de soldagem sobre o plano desejado e com a DBCP desejada (tipicamente 15mm), o sensor laser irá fornecer a leitura de um determinado valor. Este determinado valor é resultante da posição e ao ângulo que o sensor é fixado à tocha em relação ao plano. Este valor se torna 0 (zero) após a aplicação da Calibração do Zero. Em outras palavras, a Calibração do Zero faz com que o Valor de Referência do sistema de controla se torne 0 (zero) e não seja algum outro valor qualquer. A Figura 71 ilustra a região do software desenvolvido dedicada a Calibração do Zero.

CALIBRAÇÃO DO ZERO : 1 - Posicionar Manipulador na DBCP desejada.
2 - Informar amostra da Zona de Medição.
3 - Aplicar Ajuste do Zero.

Número da Amostra da Região de Interesse
700
Informar

Região de Interesse
X = 8 mm
Y = -12,41 mm
Ajuste: -12,40510 mm
Necessário
Aplicar!

Figura 71: Região do Software dedicada a Calibração do Zero.

Para realizar a Calibração do Zero com o software desenvolvido basta posicionar a tocha na Distância Bico de Contato Peça desejada, informar algum ponto do feixe próximo de onde o cordão aparecerá (Região de Interesse) e aplicar o ajuste. Ao informar algum ponto da Região de Interesse, o sistema realizará uma aquisição, determinará e informará as coordenadas do ponto e, após aplicar o Ajuste Necessário, o valor da altura desta região é calibrada para o valor 0 (zero). Este procedimento pode ser realizado para qualquer DBCP desejada e evita que o usuário pesquisador tenha que determinar o ponto de referência manualmente.

Agora, após a Calibração do Zero, deve-se realizar o Levantamento da Reta de Tendência. É preferível que este levantamento seja realizado no mesmo ponto em que a Calibração do Zero foi realizada e que se faça movimentando o manipulador e não utilizando algum gabarito. Desta forma, procura-se minimizar os erros de medições e criar uma relação entre os incrementos realizados pelo manipulador com as medições realizadas.

Para realizar o Levantamento da Curva de Tendência é recomendado mover o manipulador quatro pontos para baixo e quatro pontos para cima do zero setado e separados 1mm entre si. Para cada um destes pontos, deve-se anotar os valores fornecidos pela leitura do sensor laser e utilizar algum software para levantar a equação

característica da reta obtida. Nas Figuras 72 e 73 é possível visualizar o gráfico gerado pelo software desenvolvido e o Levantamento da Curva de Tendência realizada no software Excel.

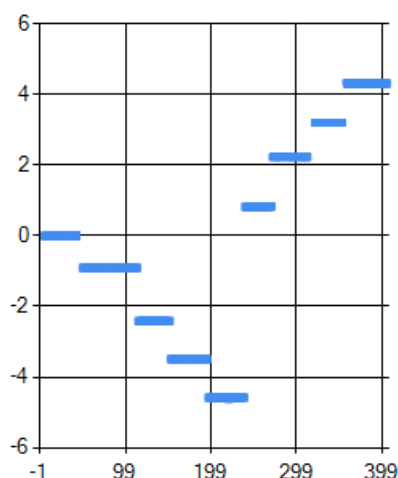


Figura 72: Gráfico das leituras gerado pelo software desenvolvido.

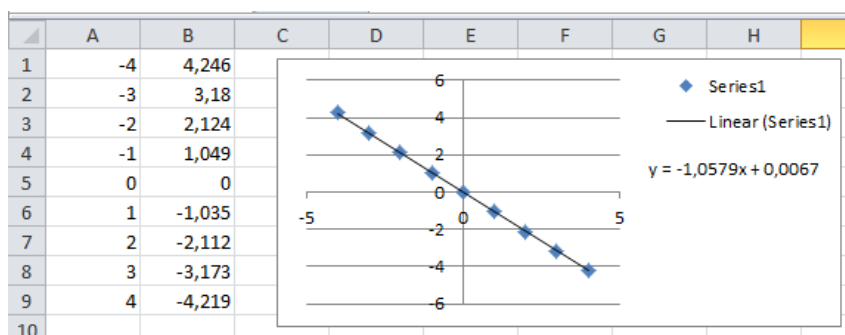


Figura 73: Levantamento da Curva de Tendência realizada no Excel

A equação da reta fornecida pelo Excel relaciona as leituras realizadas pelo sensor laser na altura e no ângulo fixado com a variação real da altura. No caso, o valor de leitura fornecido pelo sensor laser é a variável “y” da equação enquanto o valor do incremento real é a variável “x”. Assim, para determinar os incrementos reais a partir das leituras fornecidas pelo sensor deve-se utilizar os coeficientes “a” e “b” da reta gerada da seguinte maneira:

$$\text{Valor_Real} = (\text{Valor_Fornecido} - b) / a$$

Desta maneira, o sistema é capaz de identificar a correta altura dos cordões e enviar ao manipulador o tamanho do incremento na direção altura que deve ser realizado a cada camada depositada.

Para verificar a calibração realizada, é possível simular um cordão de solda utilizando uma chave allen e observar se o valor adquirido pelo sistema é condizente com as dimensões da chave, como ilustrado na Figura 74.



Figura 74: Validação da calibração realizada

Após a validação da calibração realizada como ilustrado acima, foi realizada um ensaio para a manufatura de uma parede de alumínio que é demonstrada na seção seguinte.

2.4.6 Ensaio para Validação do Sistema de Controle

Para realizar um ensaio completo utilizando o sistema de controle desenvolvido decidiu-se manufaturar uma parede de 260mm de comprimento sobre uma chapa de alumínio de 16mm de espessura com a intenção de favorecer a dissipação de calor. A DBCP escolhida para o ensaio foi de 15mm e fixou-se o sensor laser em determinado ângulo no qual o feixe fosse projetado a 20mm da TCP (*Tool Center Point*). O *setup* inicial pode ser visualizado na Figura 75.



Figura 75: *Setup* inicial para manufatura de parede utilizando sistema de controle desenvolvido

O processo de soldagem utilizado neste ensaio foi o **CMT Pulse Advanced**, com Velocidade de Soldagem de **0,5m/min** e, inicialmente, foi configurada uma Velocidade de Alimentação de Arame de **7.5m/min** que, de acordo com [20], fornece as melhores características metalúrgicas quanto a porosidade. Os procedimentos para Calibração do Zero e Levantamento da Reta de Tendência, expostos na seção anterior, foram realizados antes do início do ensaio.

A Figura 76 exibe as informações fornecida pela interface do software desenvolvido para este projeto. No caso, estão sendo exibidas informações do primeiro cordão depositado o qual obteve uma **altura média de 3,26mm** que pode ser visualizada no campo **Delta Média**. Esta média é derivada dos dados exibidos no gráfico localizado no canto inferior esquerdo da interface que exibe todas as leituras realizadas ao longo do cordão em questão. Já os outros dois gráfico presentes na interface exibem a leitura que está sendo realizada em tempo real, sendo que o localizado na porção superior exibe os dados puros fornecidos pelo sensor e o localizado na porção inferior direita exibe os dados após tratamento.

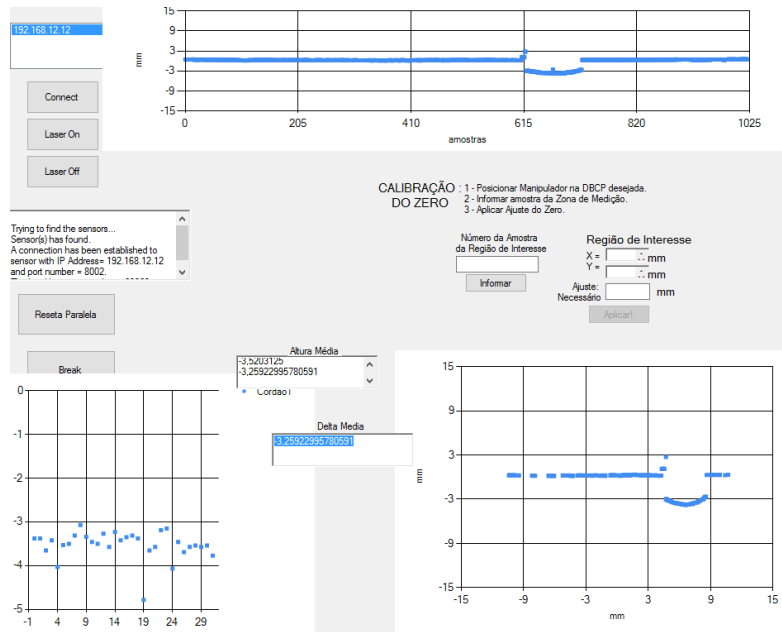


Figura 76: Interface com informações sobre o primeiro cordão da parede manufaturada

Inicialmente, foram configuradas 30 camadas para a manufatura desta parede. A altura de cada um dos cordões é registrada pelo sistema e enviada ao manipulador através de uma porta paralela utilizando 8 bits, que fornece uma resolução de 0,039mm e é suficiente para as aplicações desejadas. A altura de cada um dos cordões depositados pode ser visualizada na Figura 77.

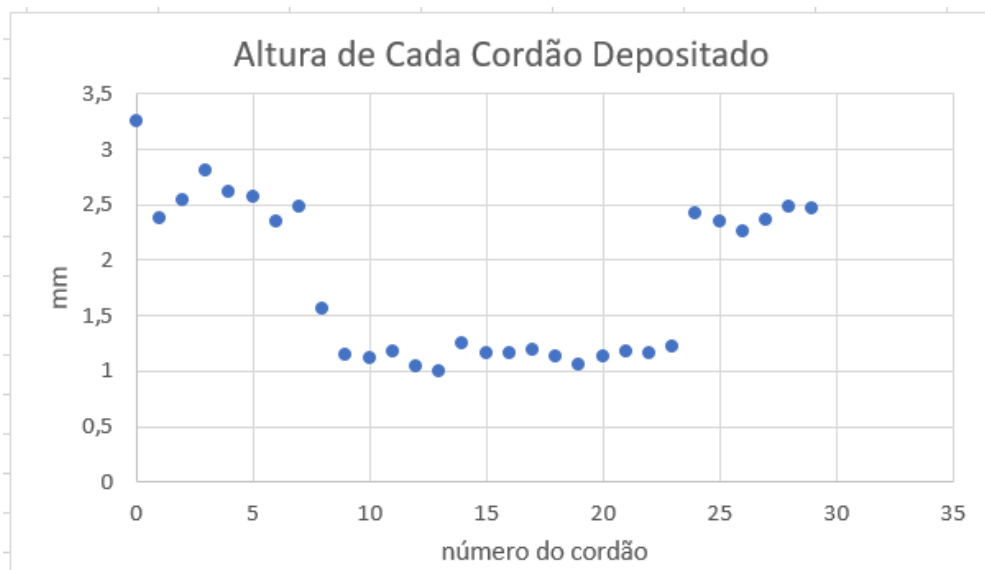


Figura 77: Gráfico da altura de cada cordão depositado

É importante observar que cada cordão obteve altura por volta de 2,5mm até o 7º depositado. Em seguida, as alturas de cada cordão giraram em torno de 1,3mm para, em seguida, voltarem novamente a obter 2,5mm cada. Este efeito era esperado, pois a velocidade de arame foi intencionalmente alterada de 7,5m/min para 3,0m/min e, em seguida, novamente alterada para 7,5m/min. Este efeito comprova que a aquisição de dados e as ações de controle estão de acordo com o que foi projetado.

A Figura 78 exibe a parede finalizada e a verificação da DBCP final, que se manteve na casa dos 15mm originais.

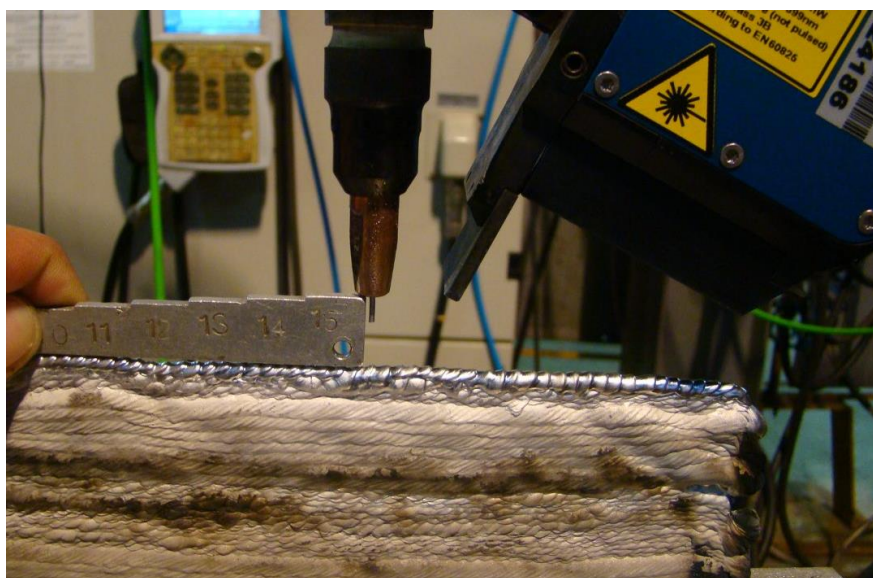


Figura 78: Parede finalizada com a DBCP mantida no valor de referência

3 RESULTADOS

Apesar do LABSOLDA ser o laboratório do campo da soldagem de união e revestimento mais bem preparado em termos de equipamentos especializados e pessoal capacitado no Brasil, pesquisas em Manufatura Aditiva via Soldagem a Arco+Arame não eram possíveis de serem realizadas neste laboratório antes do início do desenvolvimento do projeto exposto neste documento.

O procedimento desenvolvido neste projeto para o levantamento de parâmetros de soldagem para construção de paredes de alumínio se demonstrou eficiente. A definição dos parâmetros foi atingida após poucas tentativas e com o consumo de apenas algumas chapas metálicas que serviam como base. A deposição do primeiro cordão utilizando parâmetros mais energéticos que, no caso de processos MIG, acarreta em uma maior taxa de deposição de material, foi definida como requisito por gerar cordões com geometria mais homogênea e menor propensão a propagação de defeitos. A Figura 79 exibe duas paredes manufaturadas utilizando o procedimento desenvolvido neste projeto, nas quais a deposição direta foi utilizada para a manufatura da menor e a deposição reversa para a da maior.



Figura 79: Parede manufaturada utilizando parâmetros levantados.

Um compilador de trajetórias só teria utilidade caso parâmetros apropriados para a construção de paredes fossem obtidos, como demonstrado acima. Desta forma, após os parâmetros elétricos terem sido definidos, ensaios foram realizados com o Gerador de Trajetórias desenvolvido durante o projeto. Como este Gerador de Trajetória fornece toda a liberdade para o usuário pesquisador escolher o tamanho dos incrementos que o manipulador deve executar tanto no plano horizontal quanto na direção da altura durante a manufatura de peças, resultados, como os exibidos na Figura 80, foram obtidos rapidamente.



Figura 80: Sólidos obtidos utilizando parâmetros levantados e Gerador de Trajetórias desenvolvido.

Após se obter o domínio dos Parâmetros Elétricos apropriados para a construção de paredes de alumínio e o Compilador de Trajetórias estar funcionando como o esperado, um novo desafio proposto e enfrentado durante o projeto foi a manufatura de um flange em uma das extremidades de um tubo comercial de alumínio. A princípio, tal desafio se demonstrou de difícil superação mesmo com a utilização de Parâmetros Elétricos que fornecem pouco aporte térmico à peça, o que evidenciou a necessidade do desenvolvimento de estratégias para melhorar a dissipação de calor do processo. Um grande avanço foi conquistado com a utilização do Primeiro Dispositivo de Refrigeração, porém somente com o Segundo Dispositivo de Refrigeração desenvolvido que o sucesso foi plenamente alcançado, como demonstra a peça já usinada e exposta na Figura 81.



Figura: Manufatura do flange de um tubo de alumínio.

Por fim, a necessidade de uma forma eficiente para estimar ou mensurar a altura de cada cordão depositado se tornou evidente não apenas na manufatura de novas geometrias, mas principalmente na utilização de bases refrigeradas. Assim, pelo fato de inúmeros fatores contribuírem para a formação da geometria de cordões de solda, a estimativa de valores para incrementos do manipulador na direção da altura se demonstrou extremamente ineficiente e uma forma de medição das alturas dos cordões em tempo real se tornou necessária. Baseando-se nesta ideia, um sistema de controle em malha fechada utilizando sensoriamento a laser e atuação na altura do manipulador foi desenvolvido e validado após a realização da manufatura de uma parede de alumínio na qual a distância do bico de contato e a peça permaneceu constante durante a deposição de todas as 30 camadas.

4 CONSIDERAÇÕES FINAIS E PERSPECTIVAS

Dentre os processos com o qual o autor deste projeto obteve contato durante todos os anos de estudo e trabalho no campo da Engenharia de Controle e Automação, soldagem é o que possui o maior nível de controle e automação já empregado (fontes de soldagem, manipuladores, refrigeração) e, também, é o que mais demanda o aperfeiçoamento das tecnologias já existentes e a criação de novas para suprir necessidades no controle de seus processos. O desenvolvimento deste projeto proporcionou uma excelente oportunidade de observar na prática conceitos que muitas vezes se limitam às salas de aulas e telas de simulações. O conhecimento prático em softwares CAD ampliou consideravelmente e o aprendizado de uma nova linguagem de programação, C#, linguagem de maior nível e mais amigável para o desenvolvimento de interfaces, foi realizado durante o projeto.

O desenvolvimento deste e de outros sistemas de controle permitirá que características de muitos outros processos de soldagem sejam exploradas na área da manufatura aditiva em busca de melhorias nas propriedades mecânicas e metalúrgicas das peças produzidas. Estas novas tecnologias permitirão que novos materiais e geometrias sejam explorados na busca do cumprimento de requisitos de projeto. Entre os pontos mais críticos encontram-se a necessidade do aumento da capacidade de controlar tensões residuais e evitar distorções quando o processo for aplicado para a manufatura de peças de grande escala.

Os desafios no controle de processos de Manufatura Aditiva via Soldagem a Arco+Arame se concentrarão no desenvolvimento de **sistemas de medição** suficientemente robustos para serem utilizados não só como sinais na malha de controle, mas também como garantia das propriedades mecânicas e metalúrgicas de peças aditivamente manufaturadas. Formas de medição não invasivas com taxas de amostragem apropriadas e que sejam financeiramente acessíveis deverão ser aplicadas o que, conseqüentemente, exigirão que formas mais elaboradas de processamento de sinais sejam desenvolvidas.

Seguindo o escopo deste projeto, estão previstas filmagens termográficas com a intenção de realizar o cruzamento destes dados com os dados obtidos pelo sistema já desenvolvido. Desta forma, será possível obter um maior entendimento da relação entre o aporte térmico, a variação do gradiente térmico e a geometria resultante dos cordões depositados. Com estas informações, pretende-se criar estratégias de controle que sejam capazes de garantir que a transferência metálica ocorra a temperaturas desejadas pelo usuário pesquisador. Investigações sobre a viabilidade da aplicação de formas inovadoras de transferência de calor como, por exemplo, a refrigeração por magnetismo, devem ser

incentivadas. Oportunidades de parceria com outros laboratórios, como o Laboratório de Pesquisa em Refrigeração e Termofísica (POLO-UFSC), podem e devem ser criadas.

Por fim, é possível concluir que questões sobre a qualidade dos materiais, novas estratégias de deposição, aumento na capacidade de monitoramento e controle de processos, além de estratégias de usinagens mais flexíveis, estarão no foco do desenvolvimento de futuros trabalhos.

REFERÊNCIAS

- [1] WORLD ECONOMIC FORUM. **The Fourth Industrial Revolution: what it means, how to respond**. 2017. Disponível em: <<https://www.weforum.org/agenda/2016/01/the-fourth-industrial-revolution-what-it-means-and-how-to-respond/>>. Acesso em: 15 jan. 2017.
- [2] CAD SOFTWARE BLOG. **3D Printing vs Additive Manufacturing**. 2016. Disponível em: <<http://www.ptc.com/cad-software-blog/3d-printing-vs-additive-manufacturing/>>. Acesso em: 20 jan. 2017.
- [3] METAL AM. **Growth areas and market potential in Additive Manufacturing**. 2016. Disponível em: <<http://www.metal-am.com/introduction-to-metal-additive-manufacturing-and-3d-printing/growth-areas-and-market-potential/>>. Acesso em: 21 jan. 2017.
- [4] AUTODESK. **Generative Design**. 2016. Disponível em: <<http://www.autodesk.com/solutions/generative-design>>. Acesso em: 15 jan. 2017.
- [5] STRATASYS. **Tecnologias de impressão 3D da Stratasys**. 2016. Disponível em: <<http://www.stratasys.com/br/impressoras-3d/technologies#sthash.lonphPSD.dpuf>>. Acesso em: 2 fev. 2017.
- [6] Frazier, W. **Metal Additive Manufacturing: A Review**. Journal of Materials Engineering and Performance. Volume 23. June 2014.
- [7] LOUGHBOROUGH UNIVERSITY. **About Additive Manufacturing. Powder Bed Fusion**. Disponível em: <http://www.lboro.ac.uk/research/amrg/about/the7categoriesofadditivemanufacturing/powderbedfusion/>>. Acesso em: 15 de fev. 2017.
- [8] Bhavar, V.; Kattire, P.; Patil, V. **A Review on Powder Bed Fusion Technology of Metal Additive Manufacturing**. Kalyani Centre for Technology and Innovation. Bharat Forge Ltd., Pune, India.
- [9] SCIAKY INC. **Electron Beam Additive Manufacturing**. Disponível em: <<http://www.sciaky.com/additive-manufacturing/wire-am-vs-powder-am>>. Acesso em: 15 de fev. 2017.
- [10] 3DPRINT.COM. **Wire-Feed Additive Manufacturing Hold Great Potential for 3D Printing**. 2015. Disponível em: <<https://3dprint.com/66185/wire-feed-additive-manufacture/>>. Acesso em: 15 de fev. 2017.
- [11] SANDIA. **Laser Engineered Net Shaping for Repair and Modification of NWC Metal Components**. Disponível em: <<http://prod.sandia.gov/techlib/access-control.cgi/2006/066551.pdf>>. Acesso em: 20 de fev. 2017.
- [12] SANDIA. **Laser Engineered Net Shaping**. 2016. Disponível em: <<http://www.sandia.gov/mst/pdf/LENS.pdf>>. Acesso em: 25 de fev. 2017.
- [13] MERLIN PROJECT. **About MERLIN PROJECT**. Disponível em: <<http://www.merlin-project.eu/home/index.jsp>>. Acesso em: 25 de fev. 2017.

[14] Alberti, E.; Bueno, B.; D'Oliveira, A. **Additive manufacturing using plasma transferred arc**. The International Journal of Advanced Manufacturing Technology. London: Springer-Verlag, 2015.

[15] PTA Welding Systems. **ISOTEC**. Setembro, 2001. 24 p.

[16] Arcraft Plasma. **Arcraft Plasma Website**. Disponível em: <www.arcraftplasma.com>. Acesso em 10 de fev. 2017.

[17] Martina, F.; Mehnen, J.; Williams, S.; Colegrove, P.; Wang, F. **Investigation of the benefits of plasma deposition for the additive layer manufacture of Ti-6Al-4V**. Journal of Materials Processing Technology. Volume 212, Issue 6, June 2012. 1377-1386 p.

[18] NASA. **From Nothing, Something: One Layer at a Time**. 2009. Disponível em: <https://www.nasa.gov/topics/aeronautics/features/electron_beam.html>. Acesso em 10 de fev. 2017.

[19] Heralic, A. **Towards full Automation of Robotized Laser Metal-wire Deposition**. Thesis for the degree of Licentiate of Engineering. Department of Signals and Systems. Chalmers University of Technology. Göteborg, Sweden, 2009.

[20] Cong, B.; Ding, J.; Williams, S. **Effect of arc mode in cold metal transfer process on porosity of additively manufactured Al-6.3%Cu alloy**. The International Journal of Advanced Manufacturing Technology. London: Springer-Verlag, 2014.

[21] Paes, L. E. S. ; Barbosa, R. C. ; Sartori, F. ; Dutra, J. C. ; Silva, R. H. G. E. **Avaliação dos Efeitos Decorrentes do Aumento da Extensão Sólida de Areme-Eletrodo (Stick out) – Processo MIG/MAG Convencional com Transferência por Vão Livre**. XLI Consolda – Congresso Nacional de Soldagem. Salvador, Brasil, 2015.

[22] Ding, D.; Pan, Z.; Cuiuri, D.; Li, H.; van Duin, S.; Larkin, N. **Bead modelling and implementation of adaptive MAT path in wire and arc additive manufacturing**. Elsevier Ltd, 2015.

[23] Marque, C. **Prospecções Da Natureza Física da Soldagem MIG Automática de Ligas de Alumínio**. Dissertação para obtenção do Grau de Mestre em Engenharia Mecânica. Florianópolis, 2013.

[24] Alberti, E.; Silva, L.; d'Oliveira, A. S. **Manufatura Aditiva: o papel da soldagem nesta janela de oportunidade**. Soldag. Insp. vol.19 no.2. São Paulo Apr./June 2014.

[25] Motoman. **DX100 Operator's Manual for Arc Welding**. Part Number: 155490-1CD.

[26] UNIVERSIDADE FEDERAL DE JUIZ DE FORA. **Minicurso de SolidWorks**. 2013. Disponível em: <http://www.ufjf.br/get_engcomp/atividades/atividades-de-ensino/>. Acesso em: 20 de fev. 2017.

[27] UNIVERSIDADE DE SÃO PAULO. **INTRODUÇÃO A MODELAGEM MATEMÁTICA E SIMULAÇÃO DE PROCESSOS**. Disponível em: <<http://www.dequi.eel.usp.br/~felix/MSP.pdf>>. Acesso em: 20 de fev. 2017.

[28] META VISION SYSTEMS. **About Us**. Disponível em: <<http://www.meta-mvs.com/about-us>>. Acesso em: 1 de mar. 2017.

[29] NUCLEAR AMRC. **Bulk Additive Manufacturing Cell Ready to Build**. 2015. Disponível em: <<http://namrc.co.uk/centre/new-bulk-additive/>>. Acesso em: 02/03/2017.

[30] Silva, M. **Simulação e programação Off-line de robôs de montagem**. Dissertação submetida para grau de mestre em Engenharia Eletrotécnica e de Computadores. Porto, 1996.