

PROCESSO DE FABRICAÇÃO DE PEÇAS METÁLICAS POR MANUFATURA ADITIVA COM FUSÃO LOCALIZADA DE AÇOS BAIXA LIGA

Henrique Cechinel Casagrande¹

Anderson Daleffe²

Resumo: Visando melhorar os métodos atuais de produção de peças metálicas, busca-se uma nova abordagem de fabricação, com intuito de poder minimizar os gastos com matéria-prima, principalmente no momento atual em que todo setor metal mecânico sofre com a falta de insumos. Dessa forma, através de inovação e tecnologia, o objetivo desse estudo é analisar a eficiência do processo de fabricação por impressão 3D de metal por arco de arame (WAAM), e com isso, verificar através de ensaios mecânicos as características de um aço carbono de baixa liga juntamente com impacto desse método na indústria. A produção das peças, foi através da junção de dois equipamentos, utilizando uma máquina de soldagem modelo SMASHWELD 250E semiautomático e uma máquina desenvolvida para comandos através de programação, que ambas se tornaram a máquina de manufatura aditiva por fusão localizada. Com isso, o material de estudo foi arame AWS ER 70 S 6 para aço ABNT de baixo carbono. A caracterização das peças se deu por metalografia, ensaio de tração e dureza. Peças comerciais foram impressas com propósito de avaliar a eficiência do método. De modo geral, o estudo foi promissor onde, o material impresso se comportou com características próximas ao material de adição e, comparado ao processo de usinagem por exemplo, a redução de material rejeitado foi 2 vezes menor. Já em comparação ao processo de fundição, o método de manufatura aditiva teve um custo bem menor se tratando de prototipagem de peças, comprovando assim a eficácia desse processo de fabricação que é um dos pilares da indústria 4.0. Com os resultados obtidos, nota-se que essa tecnologia veio para ficar e que seu avanço é inevitável. O estudo proporcionou uma nova visão para o mercado que, de certa forma, já aguardava por esse momento.

Palavras-Chave: Manufatura aditiva, soldagem MIG/MAG, aço carbono de baixa liga, indústria 4.0, fusão localizada.

1 INTRODUÇÃO

Com a grande competitividade do mercado e a busca por baixos custos produtivos sem perdas de matéria-prima, há elevada necessidade de se utilizar novos métodos nas indústrias.

¹ Graduando em Engenharia Mecânica. Ano 2021-2. E-mail: henrique_cechinel@hotmail.com

² Professor do Centro Universitário UniSATC. E-mail: anderson.daleffe@satc.edu.br

Nas indústrias de metalmecânica à matéria-prima (metal) passa por algumas etapas de fabricação para alcançar a forma geométrica desejada. Dos processos que podem ser citados, um trabalha com manufatura subtrativa e outro método que será objeto de estudo do presente trabalho trata da manufatura aditiva.

Atualmente, trabalha-se com o processo de manufatura subtrativa, onde a mesma conta com processos de fabricação por remoção de materiais. Podem ser citados como exemplos a usinagem, estampagem, fundição, laminação, entre outros.

Num contraponto, a manufatura aditiva surgiu por volta do ano de 1981 no Japão com o objetivo de criar peças tridimensionais. Desde então a tecnologia foi avançando e juntamente esse método foi ganhando espaço no mercado, com a necessidade da criação de peças complexas que os processos atuais não possam fazer, ou até mesmo na fabricação de protótipos de geometrias e formas complexas (USINAGEM BRASIL, 2018).

Neste contexto, esta pesquisa usa o método WAAM (Wire Arc Additive Manufacturing) ou, fabricação aditiva por arco de arame, para desenvolver peças com o mínimo de matéria-prima possível e ser capaz de suprir grandes necessidades do dia-a-dia e avaliar o impacto no processo produtivo. Esse método possui boas vantagens como, por exemplo, a grande deposição de material comparado a outros processos de manufatura aditiva e, por outro lado, no final do processo normalmente é necessário realizar acabamento por usinagem para eliminar as rugosidades e imperfeições.

2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

A manufatura aditiva (MA) teve um excelente crescimento nos últimos trinta anos. É admissível que o mesmo deixou de ser um conjunto promissor de tecnologias que não tinha sua comercialização na década de 80, para um mercado que teve seu preço de US\$ 4 bilhões em 2014 (THOMPSON et al., 2016).

O processo de manufatura aditiva por arco de arame, (WAAM) é uma combinação de material de soldagem a arco e de matéria-prima. Esse método vem sendo utilizado no processo de soldagem a arco de metal a gás (GMAW), inclusive pode ser usado na soldagem a arco de tungstênio a gás (GTAW) ou até mesmo na soldagem a arco por plasma (PAW) (TABERNEIRO et al., 2018).

O processo WAAM têm como vantagens o baixo custo do equipamento de soldagem, uma grande demanda de fios padrões e taxas de deposição de material alta. Comparado com outros processos de fabricação, como por exemplo, o derretimento a laser seletivo (SLM) é possível atingir taxas de deposição de 0,1 Kg/h, ou com o Laser Metal Deposition (LMD), onde se atinge cerca de 1 Kg/h, já com WAAM pode-se obter entre 5-6 Kg/h.

Por outro lado, existem as desvantagens no sistema WAAM comparados com outros métodos de MA, tal como, uma elevada entrada de calor, conseqüentemente altas tensões residuais e distorções, além de uma menor precisão e rugosidade, sendo necessário uma etapa de usinagem no final do processo. Dessa forma, o processo WAAM é recomendado para fabricação de pré-formas com grandes geometrias, onde serão utilizados materiais com alto custo e com um grande volume de remoção de material (TABERNEIRO et al., 2018).

Em estudos, os materiais que mais se enquadram para o processo WAAM são o aço e o titânio, mas com a necessidade de fabricar, reparar e até mesmo substituir componentes na indústria aeroespacial, automotiva e sistema de defesa, o alumínio vem sendo estudado nesse processo (CASTRO E SILVA, 2018).

2.1 PROCESSO WAAM

O processo WAAM pode ser separado em três grupos, podendo ser a laser, soldagem a arco e feixe de elétrons. No processo a laser, se tem peças com ótima precisão, mas com uma baixa eficiência energética, cerca de 2-5%. Com o processo de feixe de elétrons, tem-se eficiência energética de 15-20%, mas o mesmo depende de um ambiente de alto vácuo. Já o processo de soldagem a arco, pode-se chegar a uma eficiência de até 90%, e comparado os custos em relação aos outros processos são bem menores (CASTRO E SILVA, 2018).

2.1.1 Processo GMAW (gas metal arc welding)

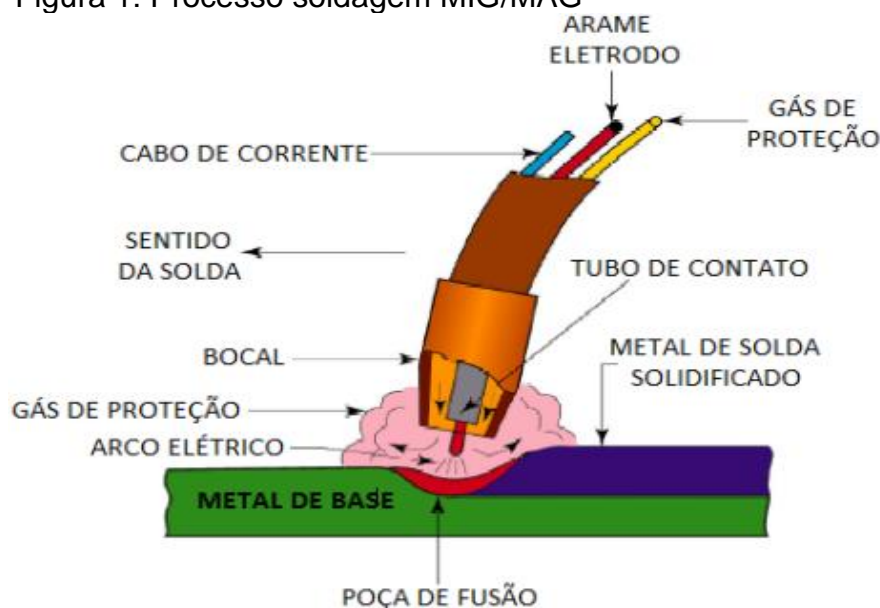
A manufatura aditiva usando arco de arrame (WAAM) é uma combinação de material depositado a arco e de matéria-prima, com a ideia da fabricação de peças 3D com soldagem produzidas camada por camada (TABERNEIRO et al., 2018).

Dessa forma a soldagem a arco foi implementada na década de 1920 e, depois de alguns anos em 1948 acabou se tornando comercial e viável sendo atribuída nas indústrias. É um processo de alimentação constante de um arame de polaridade positiva, onde é direcionado a uma peça ou substrato metálico de polaridade negativa com uma atmosfera de proteção gasosa. Quando o arame de adição está em contato com o material da base, ocorre o fechamento do curto circuito e conseqüentemente a circulação da corrente elétrica entre os polos. Com essa passagem de corrente elétrica, o material aquece até a temperatura de fusão no qual o resultado é conhecido como poça de fusão, onde uma parte dessa poça é composta pelo arame adicionado e a outra pelo metal de base, o que é conhecido por diluição.

Esse método de soldagem proporciona soldas com qualidade e grande produtividade comparado a soldagem manual por eletrodo revestido, por exemplo. É conhecido no mercado como MIG/MAG, sendo MIG (metal inert gas) para trabalhos onde a única função do gás é proteger a poça de fusão contra gases atmosféricos, ou MAG (metal active gas) para quando o gás de proteção tem ação sobre a poça de fusão (ESAB, 2020).

A Fig. 1 detalha o processo de soldagem, incluindo partes da tocha de deposição (tubo de contato, bocal), poça de fusão, arame de deposição, metal de base e gás de proteção.

Figura 1: Processo soldagem MIG/MAG



Fonte: Costa (2018)

2.2 PROCESSO MAG PARA MANUFATURA ADITIVA

Esse processo utiliza como alimentação para fusão do material um arco elétrico e a matéria-prima, onde o seu hardware é composto por uma máquina de soldagem (alimentador de arame, tocha, gás de proteção e fontes de energia) e um sistema que permite o movimento da tocha em direções diferentes. Logo, pode-se produzir uma peça aplicando camada por camada (CASTRO E SILVA, 2018).

2.2.1 Seleção dos parâmetros de soldagem

Para fabricação de peças é essencial a realização de testes para determinação dos parâmetros de soldagem, tal como intensidade, taxa de alimentação do arame e velocidade de movimentação da máquina, além do caminho a ser percorrido (em qual sentido o material será depositado). A Fig. 2 mostra ensaios realizados para obter uma melhor fusão do material (ARTAZA et al., 2017).

Figura 2: determinação de parâmetros de soldagem.



Fonte: Artaza et al (2017)

2.3 USINAGEM PARA ACABAMENTO

No século XVIII, o material mais consumido na engenharia era a madeira, no entanto existiam algumas exceções onde era utilizado ferramentas de aço carbono. Com a chegada da revolução industrial, novos materiais apareceram com um aumento de resistência mecânica. Já nos primórdios do século XIX, com ajuda da água a vapor se impulsionou a construção de novas máquinas ferramentas e com isso a

substituição do trabalho humano, sendo criadas as primeiras máquinas de usinagem (MACHADO et al., 2015).

Entende-se como operação de usinagem aquela que ao conferir à peça, forma dimensões ou acabamento, ou até mesmo uma junção desses itens, produzindo o que é conhecido como cavaco. Este pode ser definido como uma parcela de material retirado pela ferramenta da peça, que apresenta forma geométrica irregular. (FERRARESI, 2018).

Para peças fabricadas por MA é necessário a retirada da superfície, que por sua vez, possui um acabamento considerado grosseiro, conhecido como partes rugosas da peça. Campatelli et al (2018), fez a usinagem de uma peça utilizando uma fresa de topo com 8 mm de diâmetro para realizar o desbaste e acabamento, conforme Fig. 3. A peça foi pesada para posteriormente avaliar e fazer uma comparação da quantidade de material que será necessário retirar no processo.

Figura 3: Acabamento por usinagem em peças manufaturadas.



Fonte: Campatelli et al (2018)

2.4 ENSAIO MECÂNICO DE TRAÇÃO.

O ensaio de tração é realizado com uma máquina através da ajuda de duas garras que fixam o corpo de prova, uma garra estática à máquina e a outra móvel. É

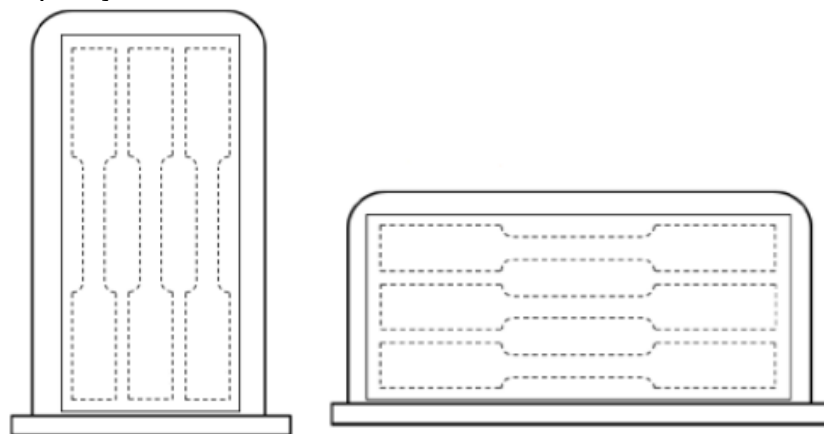
um teste uniaxial e sem atrito, com sensores para registrar o alongamento e resistência do corpo de prova (SILVA, 2019).

Consiste em uma verificação para se obter certeza das características mecânicas do material estudado e, se necessário, fazer ajustes específicos no projeto. O ensaio é realizado com a aplicação de uma carga (força) a um corpo de prova, onde ao mesmo tempo é medido as variações no comprimento (SOUZA, 1982).

Através do alongamento e força aplicados a cada instante, obtém-se um gráfico tensão-deformação, que através da interpretação correta, fornece importantes propriedades do material como, por exemplo, o alongamento, tensão de escoamento e tensão de ruptura, módulo elástico, resiliência entre outras. (BIOPDI, 2021).

Para Taberneck et al., (2018) é de suma importância verificar as propriedades mecânicas das amostras em direções diferentes da peça como mostrado na Fig. 4, para avaliar se há homogeneidade de resistência no material. Com isso, é necessário verificar se o material possui característica isotrópica ou anisotrópica. É importante avaliar o tamanho dessas amostras seguindo a NBR ISO 6892 para retiradas desses corpos de prova, onde o comprimento útil deve corresponder a, no mínimo, 5 vezes a seção retangular da parte útil.

Figura 4: Análise de tração com corpos de prova em sentidos 0° , 45° e 90° em relação ao substrato de deposição.



Fonte: Taberneck (2018)

Em forma de comparar com a literatura às tensões de trabalho para aços de baixo carbono, segundo Luz (2021), um material de aço ABNT 1020 possui uma tensão de escoamento de aproximadamente 350 MPa e tensão máxima de 420 MPa.

Já para um aço ABNT 1030 a tensão de escoamento fica com um valor de 440 MPa e sua tensão máxima de 525 MPa.

2.4.1 Anisotropia e isotropia

Quando as propriedades de um material não possuem uma direção definida, ou seja, a medida é independente da direção, é chamada de isotrópica. Sendo assim, um material isotrópico tem suas propriedades iguais para todas as direções sejam elas físicas e mecânicas. Para um material anisotrópico as propriedades físicas e mecânicas tem uma direção cristalográfica definida, dessa forma, a resistência é dependente da direção. Para verificação desses fenômenos as amostras são ensaiadas em três diferentes direções, longitudinal que se encontra a 0°, transversal 90° e 45° da direção de trabalho (BRANCO, 2007).

Para Camargo (2001), a anisotropia é uma característica frequente nos elementos da natureza, isso significa que se tem uma variação espacial maior em uma direção comparada a outra direção. Um exemplo que pode ser citado é o teor de zinco em uma região de interesse, raramente tal propriedade vai ser igual em todas as direções.

2.5 METALOGRAFIA

Segundo Rohde (2010), um produto metalúrgico deve ter controle estrutural e dimensional. O primeiro estuda a estrutura que forma a peça, sua composição química, propriedades, aplicações, etc., enquanto o segundo, por sua vez, preocupa-se em investigar as dimensões físicas do produto.

2.5.1 Ensaio metalográfico

Esse ensaio permite conhecer a microestrutura do material que passou por algum processo mecânico ou tratamento térmico, como também sua composição química e taxa de resfriamento do material, homogeneidade, naturezas das falhas, impurezas, etc. Atualmente, são usadas diversas formas para verificar as

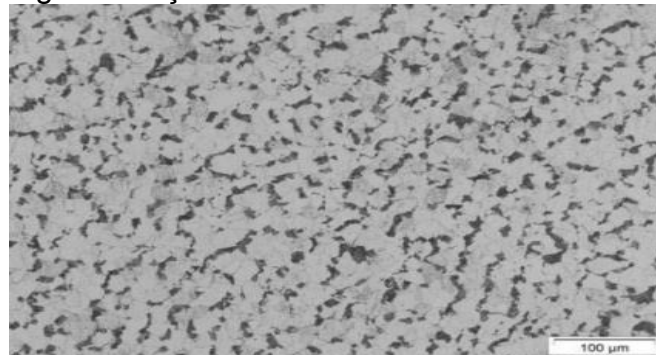
microestruturas, porém uma das técnicas mais comum é com ajuda de um microscópio (ROHDE, 2010).

Na metalografia pode-se trabalhar com a visualização da macrografia e micrografia, onde na macrografia é aceitável examinar a peça a olho nu ou através de microscópio, porém em escala de até 10 vezes (INFOSOLDA, 2018).

Já à micrografia ou análise de microestrutura é caracterizada pela estrutura e impurezas que atuam no material e as fases presentes no mesmo, tamanhos dos grãos, distribuição dos arranjos e forma que constituem o material em pesquisa. Onde todo processo é realizado com auxílio de um microscópio seguindo normas (MONFERRATO, 2021).

Segundo Costa et al., (2018), para um aço ABNT de baixo teor de carbono o fator predominância na composição é a ferrita que se destaca em cor clara como mostrado na Fig. 5, já para parte escura se há grãos de perlita onde se tem uma dureza maior.

Figura 5: Aço ABNT 1020 da literatura



Fonte: Costa et al (2018)

2.6 ENSAIO DE DUREZA

Em 1822, Friedrich Vilar Mohs criou uma escala que possuía 10 minerais classificados em uma ordem de dureza crescente pela capacidade que cada material tinha de riscar o outro. Esse método passou a ser chamado de ensaio de dureza. (SOUZA,1982).

É válido ressaltar que o mesmo consiste em fazer a medição da resistência de um material originando uma deformação plástica, isto é, uma deformação permanente e localizada podendo ser uma impressão ou risco. A partir dessa medição

é possível determinar propriedades mecânicas do material ensaiado, como resistência ao desgaste, tensão de escoamento, ductilidade, e outras propriedades (ALBUQUERQUE, 2008).

Para Pintaúde (2002), a dureza pode ser expressa com a seguinte relação, a força de penetração e a área final do penetrador sobre o material, o que provém em dimensões de pressão tal como N/mm². Afirma-se que o valor da dureza depende de três variáveis: o material que se quer ensaiar, a geometria usada no penetrador e a força aplicada. É possível realizar o ensaio de três formas, dureza por choque, dureza por riscamento e dureza por penetração.

Esse último costuma ser usado na especificação e comparação de materiais através do uso de tabelas obtendo uma correlação aproximada para os métodos de dureza Vickers, Brinell e Rockweel. (SIQUEIRA, 2016).

2.6.1 Ensaio de dureza Vickers

Segundo Zolin (2011), esse tipo de ensaio está entre os mais utilizados, seja na indústria, nas escolas de ensino ou no estudo e desenvolvimento de um produto. Tem como característica o controle de qualidade dos materiais metálicos.

De acordo com Souza (1982), essa técnica trabalha com um penetrador que possui uma ponta de diamante em forma de pirâmide e base quadrada, formando um ângulo de 136° entre faces opostas. Esse tipo de ensaio leva em variação cargas de 1 até 120 Kgf, sendo essa mudança de carga necessária para uma impressão regular, e com tamanho adequado para realizar a leitura no visor da máquina.

Com isso, com objetivo de comparar aços ABNT de baixa liga, foi realizado um levantamento seguindo a literatura para dois tipos de aço, são eles aço carbono ABNT 1020, que segundo a empresa aços nobre (2021), a dureza Vickers para esse material é de aproximadamente 115 HV, e para Luz (2017), onde traz a dureza para um aço ABNT 1030 com aproximadamente 155 HV.

3 PROCEDIMENTOS EXPERIMENTAIS

O presente estudo foi desenvolvido no laboratório de soldagem e usinagem do Centro Universitário UNISATC, onde a mesma forneceu o material de pesquisa

Tabela 1: Composição química do arame AWS ER 70 S 6

Composição química	Valores %
Carbono (C)	0,08
Silício (Si)	0,9
Manganês (Mn)	1,5
Ferro (Fe)	bal.

Fonte: Beltrán (2019)

Recomenda-se que o substrato tenha características parecidas com as do arame de adição. Dessa forma, foi utilizado uma chapa aço ABNT 1020 com sua composição química mostrada na Tab. 2, e sua secção retangular com as seguintes dimensões: 150 x 76 x 6,35 mm.

Tabela 2: Composição química do aço ABNT 1020

Composição química	Valores %
Carbono (C)	0,18 – 0,23
Enxofre (S) máx.	0,05
Manganês (Mn)	0,3 – 0,6
Fósforo (P)máx.	0,03

Fonte: Beltrán (2019)

3.2 MÁQUINA DE MANUFATURA POR FUSÃO LOCALIZADA

Para obter as peças manufaturadas foi realizado uma junção entre máquina de soldagem a arco e máquina por coordenadas CNC (centro numérico computadorizado), com intuito de poder fabricar peças impressas.

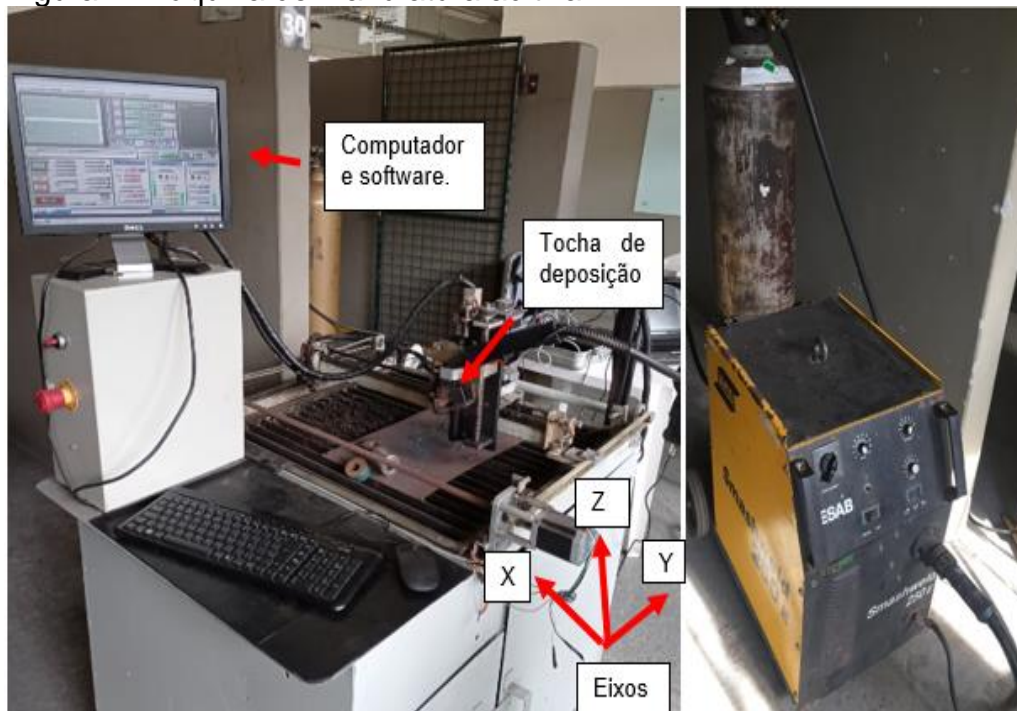
Para o presente estudo foi utilizado uma máquina de soldagem modelo SMASHWELD 250E semiautomática, da marca ESAB, conforme Fig. 7B. A mesma vale-se para os processos MIG/MAG, que por sua vez, serviu para a produção de peças com o processo MAG.

A máquina de manufatura trabalha com comando CNC, executando movimentos em três eixos, incluindo o controle de movimento da tocha que é a responsável por fazer a deposição do material camada por camada, sendo possível ter um derramamento de material uniforme.

A programação é feita manualmente através de software (como mostra a Fig. 7A) usando linguagem de programação G para Mach3, que é um software comum para programar máquinas como centro de usinagem e torno CNC, por exemplo. Destaca-se que com essa técnica é possível obter a altura de deposição do material

e movimento da tocha constante. Com isso, se adquire homogeneidade na deposição do material, para realizar a fusão localizada ao longo da peça fabricada.

Figura 7: Máquina de manufatura aditiva



Fonte: Do autor (2021)

3.3 PARÂMETROS DE FUSÃO LOCALIZADA

Para obtenção das peças é preciso buscar parâmetros ideais como, por exemplo, tensão e corrente para derreter o consumível, vazão do gás para proteção da poça de fusão, velocidade de deposição do material para boa penetração e o tipo de gás utilizado. O gás usado como proteção é uma mistura de 75% de argônio (Ar) e 25% de dióxido de carbono (CO₂), formando gás de proteção para soldagem MAG. Os dados dos parâmetros envolvendo tensão, corrente, velocidade de arame e vazão do gás estão disponíveis na Tab. 3.

Tabela 3: Parâmetros de soldagem ideal.

Variáveis	Valores
Tensão (V)	20
Vazão do gás (l/min)	14
Corrente (A)	200
Quantidade de arame (m/min)	7

Fonte: Do autor (2020)

Vale ressaltar que os dados apresentados na Tab.3 foram obtidos por meio da própria máquina de soldagem ESAB, modelo SMASHWELD 250E.

3.4 PROGRAMAÇÃO

A programação para obter as peças manufaturadas foi criada manualmente no software Mach3, tendo como prioridade a velocidade de avanço da máquina com 400 mm/minuto (milímetros por minuto), altura da tocha para cada camada de 10 mm, e o percurso que a tocha faz a cada volta.

Em uma primeira tentativa, a máquina fazia a deposição de um cordão em apenas um sentido, retornava ao ponto inicial e repetia esse ciclo. No entanto, ao final de cada cordão observou-se um decaimento demarcado como número 1 na Fig.8, deixando a peça irregular.

Figura 8: Deposição com decaída de material na extremidade

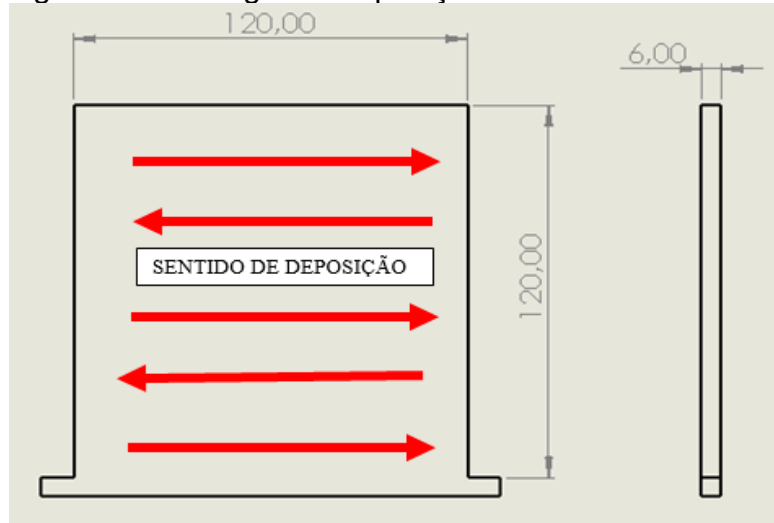


Fonte: Do autor (2021)

Devido a essa situação, uma nova estratégia em zigue-zague foi realizada e obteve-se uma deposição regular ao qual foi adotada para este trabalho.

Dessa forma, com os parâmetros de soldagem definidos foi desenvolvido três peças (paredes) para ensaio mecânico de tração. As dimensões dessas peças se encontram na Fig. 9.

Figura 9: Estratégia de deposição

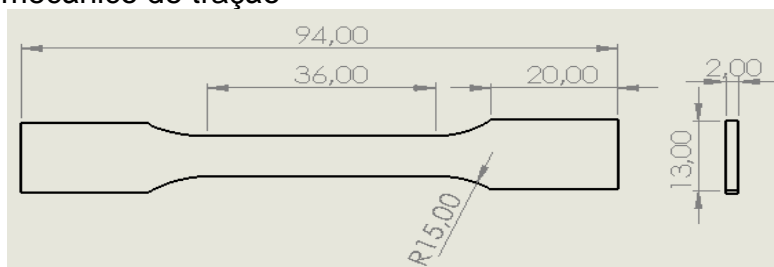


Fonte: Do autor (2021)

3.5 ENSAIO MECÂNICO DE TRAÇÃO

O objetivo desse ensaio é analisar a homogeneidade das peças em diferentes sentidos. As amostras, então, foram preparadas utilizando uma retífica plana Mello modelo P36. Em seguida foram cortadas em uma máquina de fibra a laser da fabricante Amada, modelo LCG 3015 AJ. Dessa forma, as amostras foram preparadas a 0°, 45° e 90° em relação ao substrato de deposição. Para a amostra a 0° foi retirado 6 corpos de prova, o ensaio a 45° foi retirado 5 corpos de prova, e para a peça a 90° se obteve 6 corpos de prova. Os ensaios foram realizados em uma máquina de tração da marca EMIC, modelo DL 30000, com sua capacidade máxima de 300 KN, com uma velocidade de 10 mm/min. Os corpos de prova foram cortados com dimensões conforme NBR ISO 6892. A Fig. 10 mostra as dimensões adotadas que foram adaptadas devido às limitações que a máquina apresentou.

Figura 10: Dimensões do corpo de prova para ensaio mecânico de tração



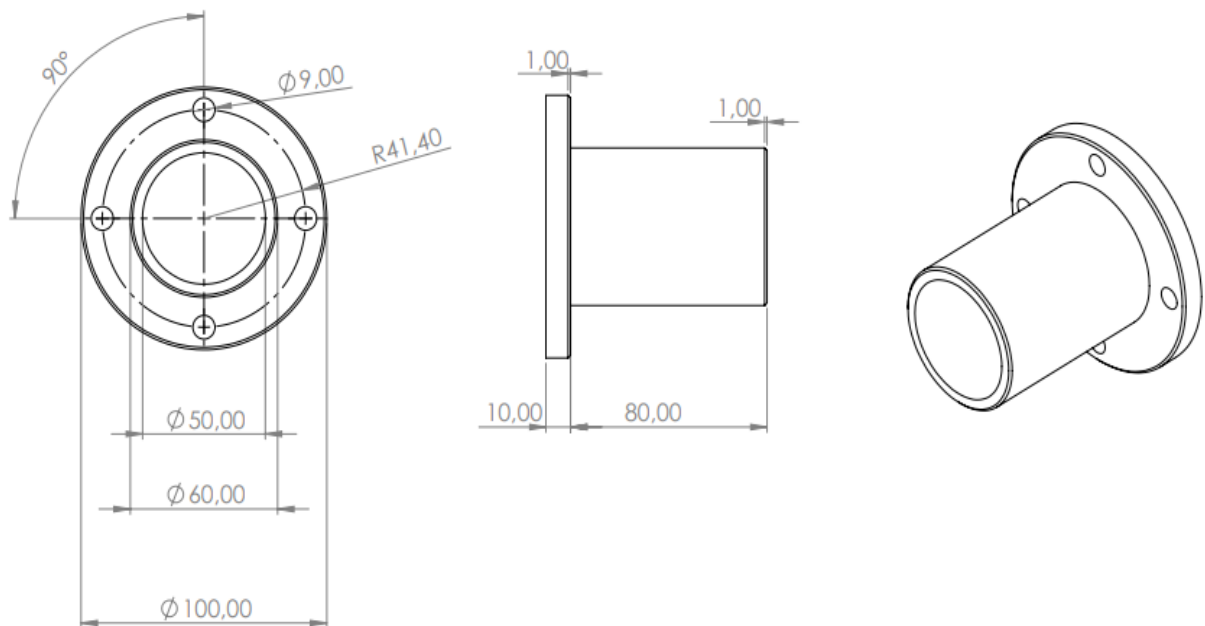
Fonte: Do autor (2021)

3.6 PEÇAS COMERCIAIS PRODUZIDAS COM MANUFATURA ADITIVA

Para validação do método de manufatura aditiva foi produzido flanges comerciais conforme Fig. 11, para comparar com outros processos de fabricação e verificar a eficácia do trabalho.

Com isso, foi realizado um projeto em forma de desenho técnico e, posteriormente, encaminhado para empresas de usinagem e fundição da região com objetivo de levantar dados relacionados a custos de processo.

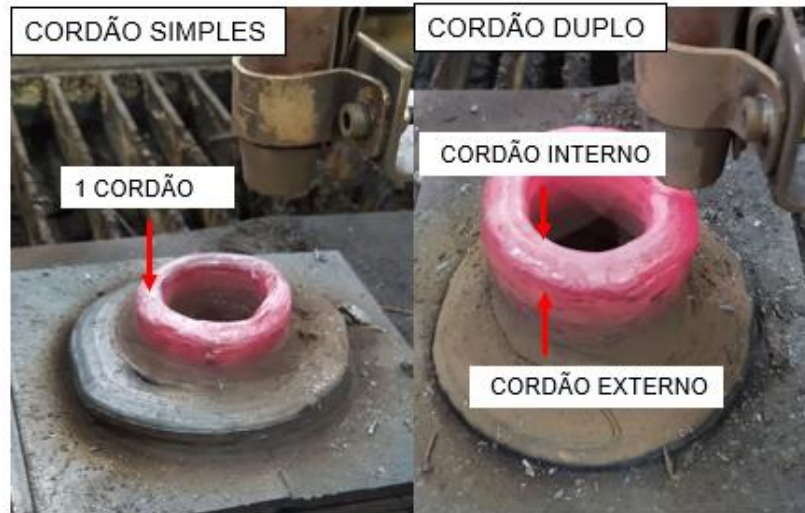
Figura 11: Desenho técnico do flange comercial



Fonte: Do autor (2021)

Após a definição do desenho foram impressas três peças comerciais utilizando a máquina de manufatura aditiva mostrada no item 4.2. Como método de avaliar a deposição das camadas foi adotado uma estratégia para impressão dos flanges, onde um flange foi desenvolvido apenas com um cordão de deposição sobreposto ao outro, e no outro flange foi realizado a soldagem de um cordão interno e externo. Para melhor entendimento mostra-se na Fig. 12 a execução dos flanges.

Figura 12: Flange simples com um cordão e flange duplo com dois cordões



Fonte: Do autor (2021)

3.6.1 Utilizando a ferramenta SAP V4 Ti para controle de parâmetros

A ferramenta SAP V4 Ti é utilizada para ter um controle dos parâmetros durante o processo de fabricação das peças. Esse equipamento conta com um notebook onde são demonstrados gráficos em tempo real de tensão elétrica, corrente elétrica, vazão do gás, quantidade de arame depositado e tempo de soldagem. O equipamento possui também uma maleta com as ferramentas necessárias para realizar o estudo, onde por exemplo, para valores de vazão de gás é necessário que esse fluido passe pelo interior da maleta ferramenta.

Abaixo, na Tab. 4 se mostra os dados obtidos ao realizar a fabricação dos flanges.

Tabela 4: Parâmetros obtidos com a ferramenta SAP V4 Ti

Variáveis	Valores
Tensão (V)	19,7
Corrente (A)	208
Velocidade do arame (m/min)	7,6
Vazão do gás (l/min)	14
Tempo (min)	44,2
Quantidade de arame (m)	336
Quantidade de arame (kg)	1,7

Fonte: Do autor (2021)

3.6.2 Obtenção das peças comerciais

Dessa forma, logo após a deposição camada por camada de material as peças foram usinadas em um torno mecânico convencional Nardini modelo Nodus ND 250, em seguida foram realizadas as furações em uma furadeira de bancada Kone modelo KMB-32.

Todas as peças foram impressas com uma velocidade de 300 mm/min na máquina de manufatura, e realizado uma análise de massa anteriormente e posteriormente ao processo de usinagem para verificar a quantidade de material descartado.

3.6.3 Verificação de trincas e poros entre a união dos cordões

As amostras foram preparadas para verificar possíveis trincas e porosidade, com isso, realizou-se análise em um microscópio digital com aumento de 40 vezes. O ensaio utilizou como material os flanges comerciais do item 4.2.

3.6.4 Ensaio de microdureza Vickers

Para esse ensaio, utilizou-se um microdurômetro modelo HMV-2TADW da marca SHIMADZE® seguindo a norma ABNT NBR ISO 6507. O estudo foi ao longo de um perfil, onde, realizou-se 17 penetrações no sentido longitudinal (sentido de maior comprimento) e, 8 no sentido transversal, aplicando-se uma força de 4,903 N, e uma distância de 1,5 mm a cada penetração. Os resultados foram obtidos através da Eq. (1).

$$HV = \frac{1,8544 \times F}{d^2}$$

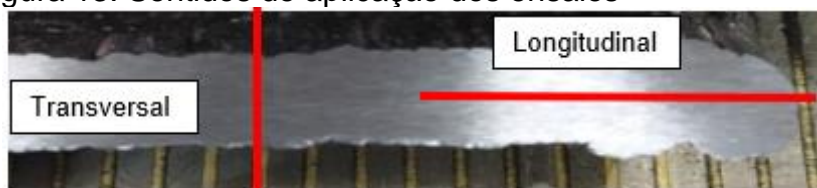
Onde:

Hv: Hardness Vickers (HV);

F: Carga aplicada (Kg);

d²: Distância entre as diagonais (mm).

Figura 13: Sentidos de aplicação dos ensaios



Fonte: Do autor (2021)

3.6.5 Análise metalográfica

Para verificação da microestrutura do material foi efetuado análise metalográfica usando o microscópio Olympus modelo SC30. O ensaio metalográfico foi realizado seguindo a norma ABNT NBR 15454.

4 RESULTADOS E DISCUÇÕES

Na sequência, serão tratados os resultados obtidos ao longo desse estudo. Destaca-se que esse trabalho teve o propósito de buscar uma quantidade significativa de ensaios com o objetivo de obter diferentes resultados, e dessa forma ter uma boa conclusão ao se tratar de um processo de fabricação relativamente novo na área metalmeccânica.

4.1 OBTENÇÃO DOS CORPOS DE PROVA PARA ENSAIO DE TRAÇÃO

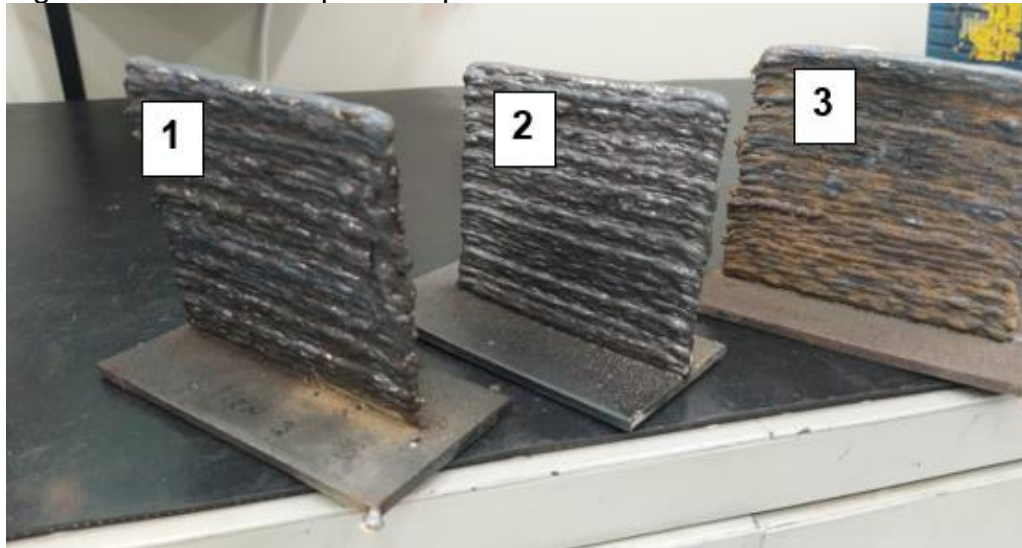
Na Tab. 5 são mostrados os resultados como análise de manufatura, onde é possível notar uma baixa eficiência de material retirado após a usinagem, fato ocorrido devido a falhas superficiais resultantes de uma má fusão por proteção gasosa. A Fig. 14 mostra as paredes feitas com manufatura aditiva.

Tabela 5: Caracterização dos cordões.

	Nº de camadas	Altura efetiva (mm)	Altura média camadas (mm/camada)	Largura média total (mm)	Largura média efetiva (mm)	Área total (mm²)	Área efetiva (mm²)	Fator de eficiência
Parede 1	31	116	3,74	5,4	2	626,4	232	37,07
Parede 2	32	119	3,72	5,5	2	654,5	238	36,36
Parede 3	31	117	3,77	5,7	2	666,9	234	35,09
Média	31,33	117,3	3,74	5,53	2	649,27	234,67	36,17

Fonte: Do autor (2021)

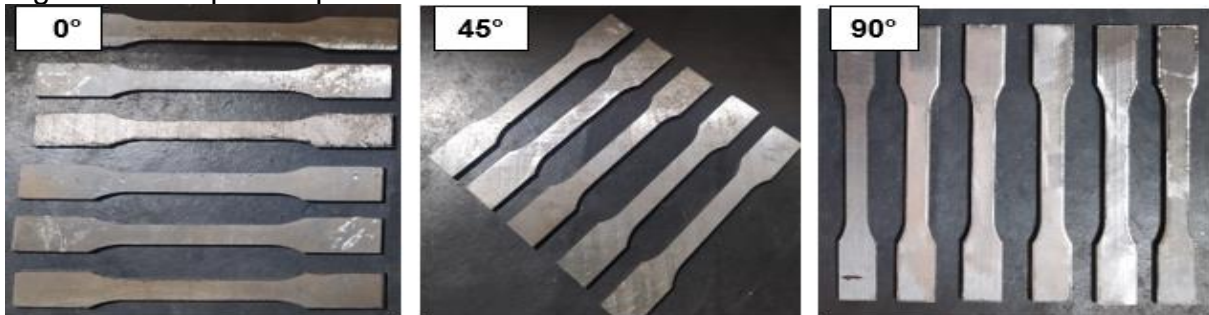
Figura 14: Paredes impressas por manufatura aditiva.



Fonte: Do autor (2021)

Abaixo são apresentados os corpos de prova em forma de resultados visando a manufatura aditiva, conforme Fig. 15.

Figura 15: Corpos de prova analisados visando manufatura aditiva



Fonte: Do autor (2021)

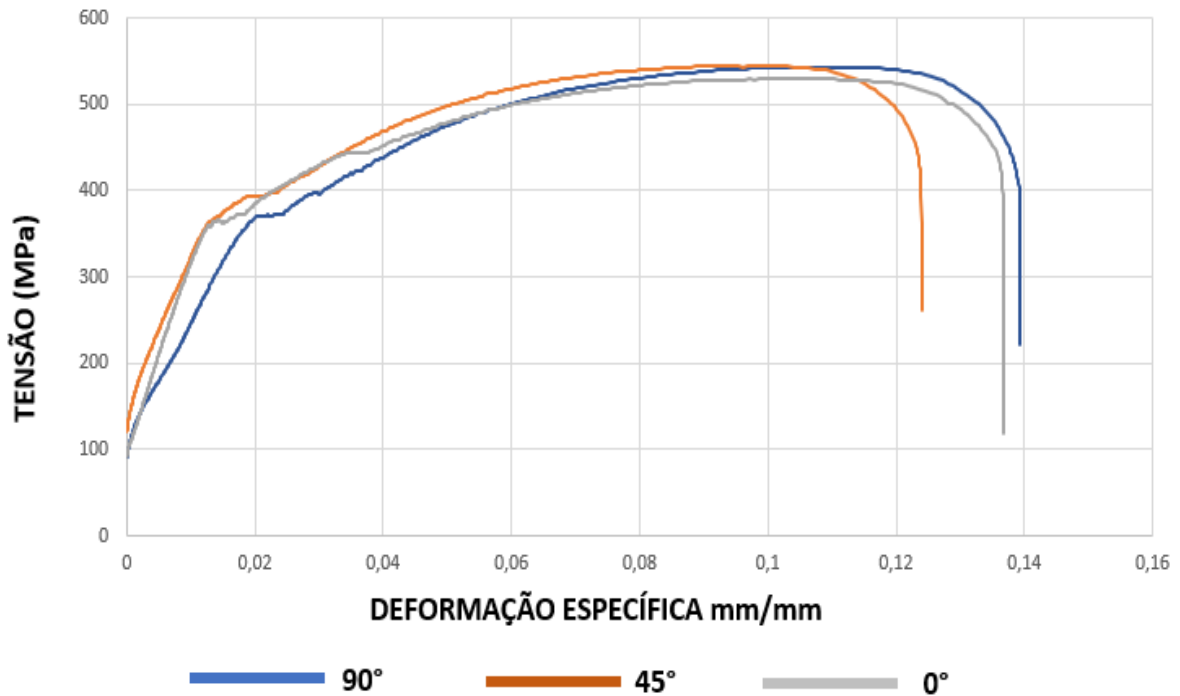
Dessa forma, apresenta-se na Fig. 16 em forma de gráfico a relação de tensão e deformação específica, através da média dos resultados obtidos dos ensaios realizados.

Tabela 6: Resultados médios do ensaio de tração em 0°, 45° e 90°

Ensaio	Tensão máxima	Tensão de escoamento	
	$\bar{\sigma}$ Máx. [MPa]	$\bar{\sigma}_e$ [MPa]	ϵ
Tração 90°	550	364	0,139
Tração 45°	544	390	0,124
Tração 0°	530	357	0,134

Fonte: Do autor (2021)

Figura 16: Ensaio mecânico de tração para 90°, 45° e 0°
TENSÃO vs DEFORMAÇÃO ESPECÍFICA



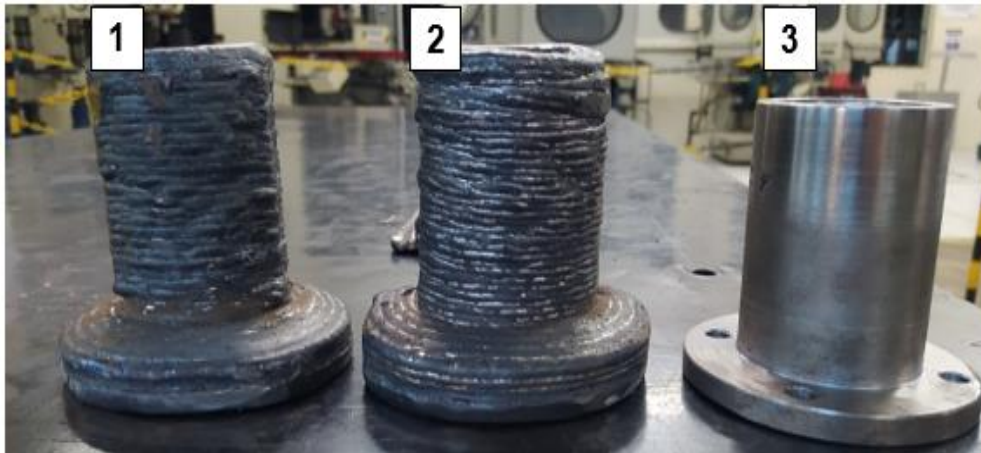
Fonte: Do autor (2021)

Como é possível perceber na Fig. 16, os corpos de prova estudados possuem um comportamento dúctil e, comparado com a Tab. 6, onde apresentam-se seus resultados, os mesmos possuem tensões máxima entre 530 MPa e 550 MPa comparado com a literatura. Segundo Luz (2021), esse aço é de baixo carbono e fica em um range entre aço ABNT 1020 e aço ABNT 1030, a tensão de escoamento também segue essa linha de comparação de resultados.

4.2 FLANGES COMERCIAIS

A Fig. 17 traz os flanges comerciais impressos, onde é perceptível a boa deposição das camadas e homogeneidade das mesmas. O flange 1 foi impresso com cordão de deposição conforme mostrado na Fig.12. O flange 2, por sua vez, foi impresso utilizando dois cordões de deposição, sendo um interno e outro externo. A imagem também mostra o flange 3 usinado e pronto para atender sua finalidade.

Figura 17: Produção dos flanges comerciais



Fonte: Do autor (2021)

Como forma de avaliar com um olhar industrial, a Tab. 6 faz uma comparação de custos e sobre-metal retirado de diferentes processos de produção para produção de uma peça apenas. A usinagem se tornou mais viável para produção em custos, porém é o processo onde se perde a maior quantidade de material devido a geometria do flange. Em contra partida, esse sobre-metal deve ser reciclado e com isso haverá um custo para aproveitamento, e não menos importante deve ser lembrado o fator meio ambiente que sofrerá com essa quantidade de reciclagem.

Tabela 6: Comparação de custo e material retirado em diferentes processos

Processo	Valores (R\$)	Massa bruta (kg)	Massa final (kg)	Sobre-metal (kg)
Fundição	650	1,96	1,180	0,78
Usinagem	115	5,58	1,180	4,4
Manufatura aditiva	237,74	1,94	1,180	0,76

Fonte: Do autor (2021)

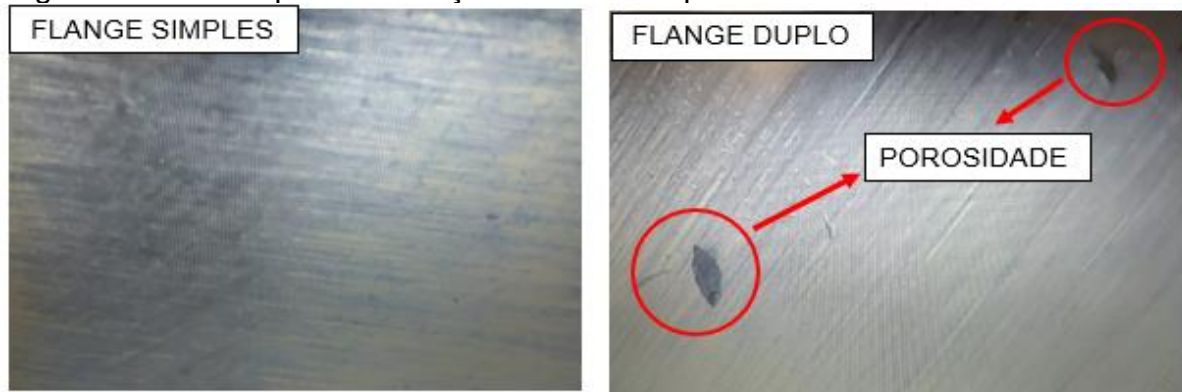
Nota-se que os processos de fundição e manufatura aditiva tem suas massas brutas bem próximas, e devido a isso o material retirado na usinagem foi próximo. Em comparação de valores, a fundição se tornou o processo mais caro devido a análise ser realizada para somente uma peça, e sendo uma geometria pequena, a relação areia/metal não se torna viável. Segundo a empresa onde foi realizado o orçamento, o molde deve conter 6 figuras, ou seja, 6 peças a cada envase para essa geometria.

O processo de manufatura aditiva se torna o método mediano, onde se perde a menor quantidade de material e o preço é acessível.

4.3 VERIFICAÇÃO DE TRINCAS E POROS

O flange simples não apresentou falhas entre os cordões, mas para o flange de cordões duplo se teve o aparecimento de falhas ao longo da peça. Essas falhas são provenientes de uma proteção gasosa insuficiente, e com isso se mostra a importância da ferramenta SAP V4 Ti para monitoramento ao longo da impressão. A Fig.18 mostra a análise feita para os dois flanges, onde a falha destacada na figura seguiu uma linearidade entre a união do cordão interno e externo ao longo da peça impressa.

Figura 18: Análise para verificação de trincas e poros.



Fonte: Do autor (2021)

4.4 ENSAIO DE MICRODUREZA VICKERS

Com esse ensaio, nota-se uma dureza uniforme ao longo do perfil para os dois sentidos estudados, sendo em sentido longitudinal com pequena variação como mostrado na Tab. 7, com desvio padrão baixo. E para o resultado em sentido transversal se obteve uma queda de dureza proveniente das paredes internas e externas onde ocorre troca de calor com o ambiente.

Tabela 7: Ensaio de microdureza Vickers

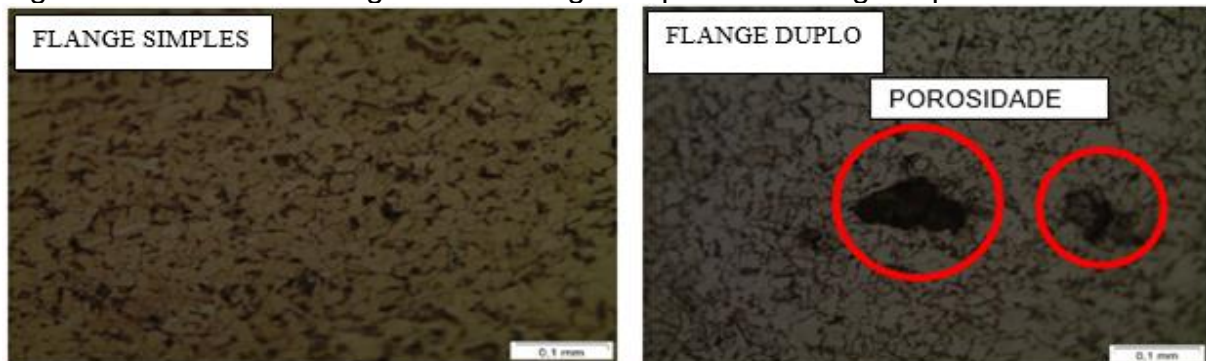
Sentido	Valores (HV)	Desvio Padrão
Transversal	150,57	6,16
Longitudinal	160,47	7,46

Fonte: Do autor (2021)

4.5 ENSAIO DE METALOGRAFIA

Apresenta-se na Fig. 19 o aparecimento de poros para o flange de parede dupla. Em comparação com a literatura conforme mostrado na Fig. 6, segundo Costa et al (2018), o material apresenta contorno de grãos característicos de um aço ABNT baixo carbono. Esse resultado fica entre um aço ABNT 1020, podendo chegar a um aço ABNT 1030, conclusão essa, devido a quantidade maior de grãos escuros, como mostrado na Fig. 19, que representa a perlita, onde se tem maior dureza. Já para ferrita apresenta-se como as partes claras e encontra-se em maior quantidade.

Figura 19: Análise metalográfica do flange simples e do flange duplo.



Fonte: Do autor (2021)

5 CONCLUSÕES

Portanto, após análise dos resultados:

- Conclui-se que o método por fusão localizada tem bons resultados por ter uma boa união e uniformidade entre os cordões e com isso homogeneidade conforme comprovada no ensaio de micro dureza Vickers.
- O material de estudo por ser arame para aço carbono de baixa liga, apresentou características que ficaram entre um aço carbono ABNT 1020 e ABNT 1030 através de análise metalográfica.
- Comparando com outros processos de fabricação, o estudo se mostrou promissor, visto que tem valores de sobre-metal próximo aos do processo de fundição e um valor mais acessível.

- Para o ensaio mecânico de tração o material se mostrou anisotrópico com uma baixa diferença entre cada sentido estudado e, em questões de tensão máxima, o material teve comportamento mais característico de aço ABNT 1030, porém em questão de tensão de escoamento se obteve um valor menor e mais próximo do aço ABNT 1020.
- O método usando a máquina de fusão localizada ainda não é acessível para produção de peças em massa, mas sim para prototipagem de peças.

Dessa forma, após conclusão, propõe-se como melhoria para futuros trabalhos envolvendo o tema:

- Criação de um banco de dados com informações de parâmetros de soldagem para fabricação de paredes devido cada necessidade e geometria das peças.
- Sistemas de limpa bico da tocha automatizado em meio a programação.
- A aquisição de um software para programação CAM.
- Sistema de resfriamento devido à alta temperatura ao decorrer da deposição de material.
- Acoplamento de uma ferramenta SAP V4 Ti para controle dos parâmetros de soldagem em tempo real.

REFERÊNCIAS

AÇOS NOBRE. Aço 1020: propriedade e preços. Disponível em: <https://acosnobre.com.br/blog/aco-1020-propriedades-dureza-preco/>. Acesso em: 05/10/2021.

ALBUQUERQUE, Victor Hugo C.; TAVARES, João Manuel R. S.; FILHO, Pedro Pedrosa R. Medição automática da dureza Brinell utilizando técnicas de processamento e análise de imagem. In: 5º CONGRESSO LUSO-MOÇAMBICANO DE ENGENHARIA, 8. 2008, Moçambique. **Artigo Eletrônico**. Disponível em: <https://paginas.fe.up.pt/~tavares/downloads/publications/artigos/CLME2008_artigo_VA_JT.pdf> Acesso em: 10/03/21

ARTAZA, T.; ALBERDI, A.; MURUA, M.; GORROTXATEGIA, J.; FRIAS, J.; PUERTAS, G.; MELCHOR, M. A.; MUGICA, D.; SUÁREZ, A. Design and integration of WAAM technology and in situ monitoring system in a gantry machine. **Elsevier**. Pontevedra, v.13, p. 778-785, junho 2017. Disponível em: <

<https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S2351978917308223> > Acesso em: 17/03/21.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **ABNT NBR ISO 6892-1:2013 Versão Corrigida 2:2018**. Materiais metálicos – Ensaio de Tração Parte 1: Método de ensaio à temperatura ambiente. São Paulo, 2018.

BELTRÁN, José Hernando Díaz. **Influência do Metal de Adição e do Gás de Proteção na Soldagem Mag de Chapas de Aço Sae 1020**. 2019. 30 f. Monografia (Graduação Em Engenharia Mecânica). Universidade Federal do Rio Grande do Sul. Porto Alegre, 2019. Disponível em: <https://lume.ufrgs.br/bitstream/handle/10183/211333/001113947.pdf?sequence=1&isAllowed=y> Acesso em: 15/05/21

BIOPDI. Ensaio de Tração. Disponível em: <https://biopdi.com.br/artigos/ensaio-de-tracao/>. Acesso em: 09/03/2021

BRANCO, Felipe Kulig; MAGNABOSCO, Rodrigo. **Influência da Microestrutura na Anisotropia de Chapas Metálicas de Diferentes Aços Estruturais**. 2007. 72 f. Relatório Final (Projeto de Iniciação Científica). Centro Universitário FEI - Campus São Bernardo do Campo – São Paulo. 2007. Disponível em: < https://fei.edu.br/~rodrmag/PROJETOS_IC/2007/IC2007_FKB.pdf > Acesso em: 08/03/21

CAMPATELLI, Gianni; MONTEVECCHI, Filippo; VENTURINI, Giuseppe; INGARAO, Giuseppe; PRIARONE, Paolo. Integrated WAAM-Subtractive Versus Pure Subtractive Manufacturing Approaches: An Energy Efficiency Comparison. 2018. **International Journal of Precision Engineering and Manufacturing-Green Technology**. V. 7, p.1-11. (2020). Disponível em: < <https://link.springer.com/article/10.1007/s40684-019-00071-y> > Acesso em: 09/03/2021

CAMARGO, Eduardo Celso Gerbi; FELGUEIRAS, Carlos Alberto; MONTEIRO, Antonio Miguel Vieira. A Importância da Modelagem da Anisotropia na Distribuição Espacial de Variáveis Ambientais Utilizando Procedimentos Geoestatísticos. In: SIMPÓSIO BRASILEIRO DE SENSORIAMENTO REMOTO. 8, 2001. Foz do Iguaçu. **Artigo Eletrônico**. Disponível em: <http://www.leg.ufpr.br/lib/exe/fetch.php/pessoais:abtmartins:0395.402.280.pdf> Acesso em: 21/03/21.

CASTRO, Maria Inês; SILVA. **Study of Deposition Strategies of a Wire + Arc Additive Manufactured Component**. 2018. 64f. Thesis: Master of Science Degree in Materials Engineering. Técnico Lisboa, 2018. Disponível em: < https://fenix.tecnico.ulisboa.pt/downloadFile/844820067125611/74180__Dissertacao.pdf >

CHIAVERINI, Vicente. **Tecnologia Mecânica**. 2ª ed. São Paulo: McGraw-Hill, 1986.

COSTA, Éder Silva; SANTOS, Denis Júnior. **Disciplina: processos de usinagem.** Divinópolis, 2006. (Apostila)

COSTA, Ubirajara. Tudo o que você precisa saber sobre o processo de soldagem MIG/MAG. **Summig.** Caxias do Sul, nov. 2018. Disponível em: <https://www.sumig.com/pt/blog/post/tudo-o-que-voce-precisa-saber-sobre-o-processo-de-soldagem-mig-mag>. Acesso em: 17/03/21.

COSTA, Tomas; LUZ, Álvaro; BALESTRA, Roseli. Influência do tempo de cementação do aço SAE 1020. **VIII COEN – Congresso de Engenharias da UFSJ.** P.7 2018. Disponível em: https://proceedings.science/proceedings/100047/_papers/89473/download/abstract_file1 Acesso em: 28/09/21.

ESAB. Processo de Soldagem: MIG/MAG (GMAW). Disponível em: https://www.esab.com.br/br/pt/education/blog/processo_soldagem_mig_mag_gmaw.cfm >. Acesso em: 15/03/21.

FERRARESI, Dino. **Fundamentos da Usinagem dos Metais.** São Paulo: Blucher, 1970.

INFOSOLDA. Ensaio macrográfico. Disponível em: <https://infosolda.com.br/biblioteca-digital/livros-senai/ensaios-nao-destrutivos-e-mecanicos-livros-senai/219-ensaio-macrografico>>. Acesso em: 15/03/21.

LMIC (Laboratório de Microscopia e Microanálises). Disponível em: <https://lmic.degeo.ufop.br/microscopia-eletr%C3%B4nica>. Acesso em: 13/05/21.

Luz, Gelson. Aço SAE 1030 Propriedades mecânicas e Composição Química. **Blog Materiais,** [s.l], 2017. Disponível em: <https://www.materiais.gelsonluz.com/2017/10/aco-sae-1030-propriedades-mecanicas.html>>. Acesso em: 05/10/2021.

Luz, Gelson. Aço SAE 1020 Propriedades mecânicas e Composição Química. **Blog Materiais,** [s.l], 2017. Disponível em: <https://www.materiais.gelsonluz.com/2017/10/aco-sae-1020-propriedades-mecanicas.html> >. Acesso em: 05/10/2021.

MONFERRATO. Ensaio de metalografia: o que é e para que serve? Disponível em: <https://monferrato.com.br/ensaio-de-metalografia-o-que-e-e-para-que-serve/>>. Acesso em: 15/03/21.

MACHADO, Álisson Rocha; ABRÃO, Alexandre Mendes; COELHO, Reginaldo Teixeira; SILVA, Márcio Bacci da. **Teoria da usinagem dos materiais.** 3ª ed. São Paulo: Blucher. 2015.

PINTAÚDE, Giuseppe. **Análise dos regimes moderado e severo de desgaste abrasivo utilizando ensaios instrumentados de dureza.** 2002. 230 f. Tese (Doutorado em Engenharia). Escola Politécnica da Universidade de São Paulo, São

Paulo, 2002. Disponível em: https://www.teses.usp.br/teses/disponiveis/3/3132/tde-07042010-111922/publico/TESE_GIUSEPPE_PINTAUDE.pdf Acesso em: 16/03/21

ROHDE, Regis Almir. **Metalografia preparação de amostras. Uma abordagem pratica versão-3.0**, outubro de 2010. Disponível em: <http://www.urisan.tche.br/~lemm/metalografia.pdf>. Acesso em: 19/03/21.

SILVA, Bruno Filipe Bronze da. **Aquisição por Visão Artificial e Medição Automática de Micro Dureza Vickers**. 2015. 95 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia de Instrumentação e Metrologia). Instituto Superior de Engenharia do Porto, Porto, 2015. Disponível em: <
https://recipp.ipp.pt/bitstream/10400.22/8020/1/DM_BrunoSilva_2015_MEIM.pdf
> Acesso em 15/03/21.

SILVA, Carlos Henrique Ferreira da. **Comportamento Mecânico e Caracterização Microestrutural de um Aço DP Laminado a Frio com Revestimento de Zn para Estampagem**. 2019. 78 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia de Materiais e Nanotecnologia). Universidade Presbiteriana Mackenzie, São Paulo, 2019. Disponível em: <
<http://tede.mackenzie.br/jspui/bitstream/tede/3837/5/Carlos%20Henrique%20Ferreira%20da%20Silva.pdf> > Acesso em 15/03/21.

SIQUEIRA, Leila Corrêa Barreto. **Biocompósitos P3HB/Nano-HAP para uso na área médico-odontológica**. 2016, 119 f. Tese (Doutorado em Engenharia e Ciência dos Materiais). Universidade Estadual do Norte Fluminense Darcy Ribeiro, Campo dos Goytacazes, 2016. Disponível em: <https://uenf.br/posgraduacao/engenharia-de-materiais/wp-content/uploads/sites/2/2013/07/TeseLeilarev4Ficha.pdf> Acesso em: 18/03/21

SOUZA, Sérgio Augusto de. **Ensaio mecânicos de materiais metálicos – Fundamentos teóricos e práticos**. 5ª ed. São Paulo: Editora Bluncher, 1982.

TABERNERO, Iván; PASKUALA, Amagoia; ÁLVAREZB, Pedro; SUÁREZCB, Alfredo. Study on Arc Welding processes for High Deposition Rate Additive Manufacturin. **CIRP Conference on Electro Physical and Chemical Machinin**. Spain.V.68, p.358-362, 2018. Disponível em: <
<https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S2212827117310363>>
THOMPSON, Mary Kathryn; MORONIB, Giovanni; VANEKERC, Tom; FADELD, Georges; CAMPBELLE, R. Ian; GIBSONF, Ian; BERNARDG, Alain; SCHULZH,Joachim; GRAFH, Patricia; AHUJAI, Bhriugu; MARTINAJ, Filomeno. Design for Additive Manufacturing: Trends, Opportunities, Considerations and Constraints. **CIRP Annals Manufacturing Technology**. V.65, p.737-760, 2016. Disponível em: <
<https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S0007850616301913>>. Acesso em: 03 mai. 2020.

Um pouco da história da manufatura aditiva. **Usinagem Brasil**. São Paulo, 2018. Disponível em: <<http://www.usinagem-brasil.com.br/13122-um-pouco-da-historia-da-manufatura-aditiva/pa-5/>> Acesso em: 04 abril 2021.

ZOLIN, Ivan. **Curso técnico de automação industrial: ensaios mecânicos e análises de falhas**. 3. ed. 102 f. – Santa Maria: Universidade Federal de Santa Maria: Colégio técnico Industrial de Santa Maria, 2011.

AGRADECIMENTOS

Agradeço a Deus que me permitiu chegar até aqui, a minha noiva, e minha família pelo apoio ao longo desses anos de dedicação, em especial ao orientador Dr. Anderson Daleffe pelos ensinamentos passados até este momento, a UNISATC por todo material fornecido para execução desse estudo, e a Plasson do Brasil pelas contribuições que proporcionaram esse momento.