



## CARACTERIZAÇÃO DE CORPOS DE PROVAS DE AÇO INOXIDÁVEL 304L DEPOSITADOS POR PROCESSO DE MANUFATURA ADITIVA DE METAIS COM FUSÃO LOCALIZADA

Marcelo Ferreira<sup>1</sup>

Anderson Daleffe<sup>2</sup>

Adelor Felipe da Costa<sup>3</sup>

Fabio Peruch<sup>4</sup>

Daniel Fritzen<sup>5</sup>

**Resumo:** Processos de produção que visam mais agilidade, qualidade, precisão final e menor desperdício de matéria prima são buscados ano após ano, é o que demonstra a história através das revoluções industriais. Hoje vivencia-se a quarta revolução industrial, e um dos seus pilares é a manufatura aditiva, processo que visa a execução de peças com geometrias complexas através da adição de matéria-prima. No processo por metal depositado, o arame de solda é a matéria prima, portanto a escolha de materiais é ampla. O aço inoxidável é utilizado em inúmeras áreas e em várias aplicações, devido a suas ótimas características físicas e químicas. O objetivo deste trabalho é analisar o processo de manufatura aditiva validando mecanicamente a eficiência do aço inoxidável 304L depositado através de fusão localizada. A manufatura aditiva foi realizada através de metal depositado, formando uma parede com diversas camadas onde o metal adicionado é sobreposto ao anterior, executado através de um braço CNC com programação definida e movimento constante, encontrando os parâmetros ideais de máquina para o processo de deposição metálica. Verificou-se a execução de paredes de solda consistentes, com propriedades e dimensões suficientes para extração dos corpos de prova através de processos mecânicos, retirados em diferentes sentidos: paralelo, perpendicular e oblíquo aos cordões realizados, além de ensaios de tração com resultados de tensão máxima 15,8% maior, e dureza com valores 6,4% de diferença aos de referência do aço inox 304L, validando o método utilizado e o material resultante.

**Palavras-Chave:** Inox 304L. Manufatura Aditiva. Metal Depositado.

### 1 INTRODUÇÃO

A indústria sempre buscou a evolução e adaptação, o que conta sua história, esteve continuamente em busca de inovação e melhoria dos meios de

---

<sup>1</sup> Graduando em Engenharia Mecânica. Ano 2021/1. E-mail: marceloferreeira@hotmail.com

<sup>2</sup> Professor do Cento Universitário UniSATC. E-mail: anderson.daleffe@satc.edu.br

<sup>3</sup> Professor do Cento Universitário UniSATC. E-mail: adelor.costa@satc.edu.br

<sup>4</sup> Professor do Cento Universitário UniSATC. E-mail: fabio.peruch@satc.edu.br

<sup>5</sup> Professor do Cento Universitário UniSATC. E-mail: daniel.frtizen@satc.edu.br



produção. Entre os séculos XVIII e XIX ocorreram a primeira e segunda revolução industrial, que geraram desenvolvimento em indústrias de ferro e aço, progresso na área química e de petróleo, avanços na indústria têxtil e elétrica, dando início a uma era voltada para a produção em massa.

Já a Terceira Revolução Industrial ocorreu entre os anos de 1950 e 2000, em que começaram a destacar-se indústrias de alta tecnologia, em áreas de robótica, eletrônica, informática e de telecomunicações. Em consequência disso, houve reformulação dos meios de produção com a introdução dos recursos tecnológicos, o que resultou em mudanças definitivas até os dias atuais.

Hoje vivencia-se a Indústria 4.0, também conhecida por quarta revolução industrial, termo utilizado para representar novos métodos de fabricação inteligente, na qual há comunicação entre processos físicos e virtuais, permitindo criar e desenvolver novos produtos com mais agilidade, maior produção, qualidade e precisão final (MAIA ABREU et al., 2018).

Segundo Tadeu e Santos (2016), o que diz o relatório do BCG (*Boston Consulting Group*) é que a Indústria 4.0 é dividida em nove novas tecnologias, sendo elas: robôs automatizados; manufatura aditiva; simulação; integração horizontal e vertical de sistemas; internet das coisas industriais; *big data e analytics*; nuvem; segurança cibernética e realidade aumentada.

Diante disso, a manufatura aditiva, ou impressão 3D, é um dos segmentos que está revolucionando a execução de peças com geometrias complexas, através de adição de matéria-prima e com opção de utilização de diversos materiais (ALBERTI; BUENO; D'OLIVEIRA, 2015).

Dados sobre o setor mostram que o mercado mundial de manufatura aditiva envolvendo produtos e serviços está beirando os 12 bilhões de dólares, valor quase 120% maior se comparados com uma década atrás (WOHLERS REPORT, 2020, *apud* MASUCH, 2020). E estima-se que pode ultrapassar os 36 bilhões de dólares nos próximos sete anos (iCrowd Newswire, 2019).

De acordo com Cerqueira; Diéguez e Camacho (2017), utilizando o procedimento de manufatura aditiva de metais por fusão localizada é possível realizar o uso do material de maneira mais eficiente, introduzir meios de automação, obter velocidade de produção mais alta do que outro método aditivo ou meios de fabricação convencionais, executar peças sem a utilização de ferramenta e fabricação de metais morosos.



Na realização de adição camada por camada através de arco e fio, é impreterível realizar ensaios mecânicos e de microestrutura, pois durante o processo ocorrem derretimento, resfriamento rápido, solidificação e reaquecimento, influenciando diretamente nas propriedades finais da peça (CERQUEIRA et al., 2018).

Altas temperaturas provenientes da soldagem podem alterar as principais propriedades do aço inoxidável, suceder na diminuição da ductilidade, tenacidade, resistividade elétrica, resistência ao impacto e a corrosão, e ainda ao aumento da dureza. A microestrutura também sofre alterações, o crescimento de grãos pode gerar trincas na zona fundida, dependendo de sua classificação. Estas possíveis mudanças na sua característica limitaram a aplicabilidade destes aços em estruturas soldadas. Porém ainda assim o aço inoxidável é utilizado em diferentes ramos, indústrias alimentícias e químicas, componentes de turbinas e de tubulações de petróleo, utensílios de cozinha, entre outros. Estas diversas aplicações se dão devido a sua excelente resistência aos óxidos e a corrosão sob tensão, bem como boas características de fabricação e simples limpeza (GUIMARÃES, 2005).

Analisando este contexto, como visto que a popularidade da manufatura aditiva está em constante crescimento, é necessário conhecer detalhadamente o processo de deposição e o material resultante deste procedimento utilizando o método de soldagem.

Assim, este trabalho busca analisar o processo de deposição através da manufatura aditiva, verificando as diferenças dimensionais e de processo entre as camadas projetadas e as camadas obtidas pela manufatura, conhecer as características mecânicas e estruturais do metal depositado por fusão localizada através de corpos de prova de aço inoxidável 304L utilizando os parâmetros de soldagem ideais do material.

## **2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA**

Na revisão bibliográfica será mostrado a definição de manufatura aditiva, as características do processo de soldagem, parâmetros, influências no procedimento e ensaios normalmente realizados para a comprovação das propriedades finais do material adicionado. Bem como todas as informações relevantes para o desenvolvimento do estudo abordado neste trabalho.



## 2.1 SOLDAGEM

A soldagem MIG/MAG tornou-se um dos mais importantes meios utilizados para a realização de uniões metálicas, onde a alimentação constante de arame consumível é fundida através de arco elétrico em uma peça metálica, utilizando o fluxo de gás como atmosfera protetora, podendo ser realizado utilizando MIG (gás metálico inerte) e MAG (gás metálico ativo) (ESAB; FORTES; VAZ, 2005).

### 2.1.1 Automatização da soldagem

A automatização da soldagem MIG/MAG é de possível realização, mas também é considerado como um processo semiautomático. A alimentação do arame acontece por meio de motores e a movimentação da soldagem ocorre através de programação, podendo tornar-se um dos tipos mais baratos de manufatura aditiva, onde é desenvolvido peças através da técnica de camada sob camada realizando a deposição do material (PAMPLONA, 2018).

A tocha pode ser posicionada com o mínimo de erro utilizando-se de linguagens de programação CNC, onde a comunicação ocorre por intermédio de códigos e a criação dos mesmos pode ser realizada via manual, ou então mediante softwares CAD/CAM (CERQUEIRA; DIÉGUEZ; CAMACHO, 2017).

Alta taxa de deposição, maior eficiência energética e custos inferiores, são os principais fatores que diferem o processo de metal depositado por fusão localizada de outros tipos de manufatura aditiva (KARMUHILAN; SOOD, 2018).

## 2.2 PROCESSOS GERAIS DE OPERAÇÃO

### 2.2.1 Matéria-prima

Utilizar o fio de solda como matéria prima é uma vantagem, pois a composição química é conhecida e possui ampla gama de tipos de materiais (KNEZOVIĆ; TOPIĆ, 2019).

Durante o procedimento, ocorrem fenômenos que podem implicar diretamente nas condições do resultado: características físicas, variações no



equipamento e parâmetros, os quais devem ser analisados e aplicados de acordo com a matéria-prima a ser depositada e o método a ser executado (SILVA, 2017).

### **2.2.2 Material de base**

O processo de deposição de camada por camada utiliza um arame que é derretido sob uma placa de base que deve ser do mesmo material do arame, deve-se garantir as condições de soldagem adequadas, assim como as propriedades do fio e do substrato a serem utilizados (CERQUEIRA et al., 2018).

A placa de base têm como principais funções realizar a sustentação do metal que é depositado e também dissipar parte do calor gerado pelo sistema durante o início da deposição do material (CERQUEIRA; DIÉGUEZ; CAMACHO, 2017).

No desenvolver da deposição metálica o grande aporte de calor tende a “puxar” as extremidades da placa de base em direção ao centro dos cordões. A placa dobra junto com a parede e a deforma, mesmo fixada irá produzir tensões residuais após soltar a base, além de que, pode interferir nas dimensões da parede. Pode-se construir uma estratégia de construção balanceada, onde camadas são depositadas em ambos os lados da placa, assim ocorrendo um equilíbrio de tensões e maior uniformidade na parede (KNEZOVIC; TOPIĆ, 2019).

## **2.3 PARAMETRIZAÇÃO**

Definir os parâmetros adequados de soldagem é uma etapa importante no planejamento do processo de manufatura aditiva (ARTAZA et al., 2017).

### **2.3.1 Parâmetros de execução das camadas**

Tempos de espera entre as ações são importantes para evitar derretimento excessivo onde já houve deposição, além dos principais parâmetros de solda: velocidade de alimentação do arame, tensão e corrente (CAMPATELLI et al., 2020).

Sendo assim, para melhorar a qualidade de acabamento e operação, regular o gás protetor de acordo com o material a usar é fundamental, utilizar os padrões ideais de acordo com o material escolhido resultam em mais estabilidade no processo e redução de respingos (CERQUEIRA et al., 2018).



### 2.3.2 Estratégia de construção de paredes

Planejar o caminho da tocha é importante para melhorar a eficiência do processo e garantir a integridade do material a ser depositado (ARTAZA et al., 2017).

Os indicadores do procedimento influenciam na geração das trajetórias, escolhê-los corretamente acarretará no número de caminhos ideais para realizar o objeto final (SILVA, 2017).

É relevante considerar o sentido do cordão, uma vez que sempre iniciado no mesmo ponto ocorre um início de cordão mais alto, e ao final do mesmo, ficará mais baixo. De acordo com o número de camadas, a diferença de altura entre esses dois pontos irá aumentar. É importante realizar a soldagem em “ZIG-ZAG” sem apagar a tocha, fazendo com que as alturas iniciais e finais do cordão compensem, resultando em uma parede mais uniforme (PAMPLONA, 2018).

### 2.3.3 Geometria do cordão

Deve-se considerar os parâmetros relacionados a geometria, como o controle da entrada de energia, velocidade de deslocamento, largura de deposição, espessura da camada, diâmetro do fio de arame, taxa de deposição e sequência de aplicação das camadas, itens esses relacionados com as dimensões do cordão, regulados também para evitar disparidades dimensional (HORGAR et al., 2018).

Para otimizar processos busca-se cordões com espessuras que permitam reduzir o número de passes para alcançar as dimensões desejadas (ZIMMERMANN; BOND, 2016).

## 2.4 CAMADA DE DEPOSIÇÃO

Garantir que a geometria programada seja o mais idêntico possível da final e assegurar a totalidade estrutural exigida são os maiores desafios da manufatura aditiva (ARTAZA et al., 2017).

Defeitos podem ser ocasionados por incorretas programações de caminhos, cavidades e porosidades podem ocorrerem em partes mais grossas do



cordão, e falha de deposição em cruzamentos (KNEZOVIC; TOPIĆ, 2019). A falta de fusão também pode ocorrer devido a regulação incorreta do maquinário (SILVA, 2017).

Na construção das camadas subsequentes o calor é inevitável, ocorrido devido ao reaquecimento, pode ocasionar mudanças estruturais internas no material (ERIKSSON et al., 2018).

Como a deposição metálica é baseada em camadas, a área mais crítica é aquela localizada na sobreposição das duas camadas, ou o mais próximo possível dela (CERQUEIRA et al., 2018).

## 2.5 AQUECIMENTO NO PROCESSO

Na adição de camadas ocorre concentração de calor excessivo no local onde acontece a deposição, pois o resfriamento do mesmo por condução é bloqueada devido as camadas adicionadas anteriormente permanecem aquecidas, diferente do ocorrido no primeiro cordão, onde o material de base auxilia na dissipação deste calor, resultando em um procedimento inicial mais limpo e preciso (PAMPLONA, 2018).

O ciclo térmico deste procedimento ocorre com um rápido aquecimento, seguido por uma rápida solidificação do material depositado, que continuam aquecido quando recebem as seguidas deposições, onde ocorre novamente reaquecimento e resfriamento (SILVA; ASSUNÇÃO; ALMEIDA, 2018).

### 2.5.1 Consequência do aquecimento

A penetração excessiva das camadas ocasionada pelo cordão anterior ainda estar aquecido irá acarretar diferenças de altura consideráveis, uma vez que será necessário repetir o processo de deposição metálica mais vezes até a altura final. Consequência de cordões mais baixos, será a compensação na largura do mesmo, influenciando nas dimensões efetivas (PAMPLONA, 2018).

Uma maior taxa de deposição deste tipo de manufatura aditiva resulta em um excessivo aporte térmico. Este calor gerado pode levar a grandes tensões residuais e distorções, acabamento superficial carente de correções geométricas e propriedades mecânicas alteradas. Ficando em evidência a importância do estudo do comportamento e variação da temperatura deste processo (YANG; WANG; ZHANG, 2017).



Resfriamento este que é o que mais influencia na microestrutura final do material (CERQUEIRA et al., 2018).

Conseqüentemente, com a alteração da microestrutura, as propriedades mecânicas também serão afetadas, principalmente devido as camadas adicionadas posteriormente (MÜLLER et al., 2019).

## 2.6 ENSAIOS E PROPRIEDADES

O aporte térmico influencia diretamente na construção do material por manufatura aditiva via soldagem, pois tanto a micro como a macroestrutura são construídas durante o processo, então após ocorrer o mesmo, deve-se preocupar em realizar ensaios que examinem a plenitude das paredes e analisem possíveis defeitos. Ensaios de tração, cisalhamento e dureza são classificados como ensaios destrutivos, e devem ser realizados. Ensaios de líquido penetrante, ultrassom e por partícula magnética, classificados como ensaios não-destrutivos, também podem ser executados (SILVA, 2017).

A resistência à fadiga do material gerado pode superar os valores de referência, enquanto resistência mecânica e ductilidade podem atingir valores aceitáveis, dependendo do material. Analisar em sentido paralelo ou perpendicular ao cordão da solda também afetam os valores (KNEZOVIC; TOPIĆ, 2019).

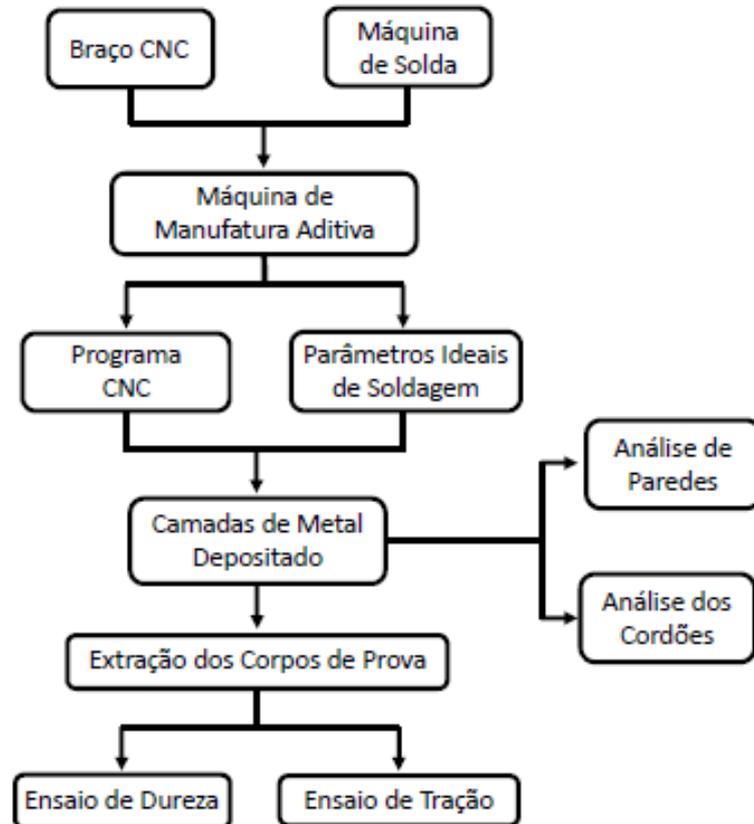
Em ensaios realizados em corpos de provas construídos por meio de manufatura aditiva em processo de soldagem, os mesmos apresentavam fissuras semelhantes a pequenas covas, de diferentes tamanhos, e que representaram alterações em sua resistência (WANG et al., 2018).

Para melhorar as propriedades micro-estruturais e aliviar tensões, pode-se realizar trabalho a frio por meio de laminação. Tratamento térmico pode ser aplicado para desenvolver propriedades mecânicas, e acabamento em usinagem é necessário devido a rugosidade e a geometria do cordão proporcionada pela soldagem (CUNNINGHAM et al., 2017).

### 3 PROCEDIMENTO EXPERIMENTAL

O trabalho experimental foi realizado nos laboratórios do departamento de Engenharia Mecânica do Centro Universitário UniSATC, e o fluxograma apresentado na Figura 1 descreve a sequência de execução do projeto.

Figura 1: Fluxograma do procedimento experimental.



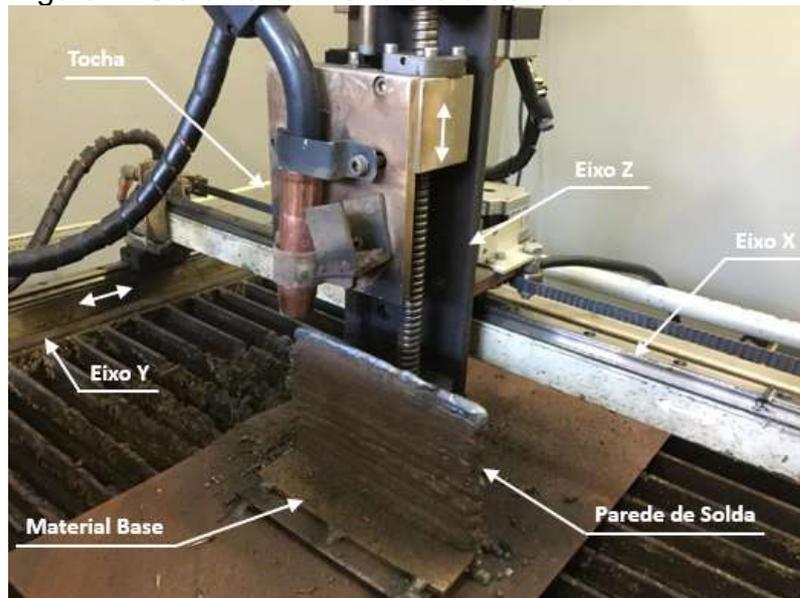
Fonte: Do autor (2021).

#### 3.1 MÁQUINA DE MANUFATURA ADITIVA

A máquina de solda (marca ESAB, modelo Smashweld 250E) foi adaptada e interligada a um braço CNC, que possui comunicação externa com software para programação dos caminhos em três eixos: X, Y e Z.

A tocha da máquina de solda é acoplada ao braço CNC que realiza a movimentação para deposição do arame na peça em uma bancada. O movimento é constante, o que permite uma parede com cordões mais semelhantes. A Figura 2 mostra o sistema de manufatura aditiva por deposição metálica.

Figura 2: Sistema de manufatura aditiva.



Fonte: Do autor (2021).

### 3.2 ARAME DE SOLDA

Utilizou-se o arame de aço inoxidável 308L, como mostra a Figura 3, da marca Golden Bridge, disposto em bobina de 15 kg e com 1,2 mm de diâmetro, seguindo a norma ISO 14343 e a especificação AWS A5.9 de fabricação de consumíveis de solda.

Figura 3: Arame de aço inoxidável AWS ER308L.



Fonte: Do autor (2020).

E conforme o fabricante, as propriedades químicas estão dispostas na Tabela 1:



Tabela 1: Composição química do arame conforme fabricante.

C	Mn	Si	Cr	Ni	Mo	P	S	Cu
0,024	1,72	0,48	19,76	9,83	0,006	0,018	0,01	0,06

Fonte: Adaptado de Tianjin (2021).

### 3.3 PARÂMETROS DE SOLDAGEM

Os parâmetros de soldagem são exibidos na Tabela 2, conforme literatura para esta classe de materiais, ciente que valores podem oscilar de acordo com a tolerância da máquina e a variação no decorrer da execução dos ensaios, além de pequenos ajustes para cada novo trabalho.

Tabela 2: Propriedades de máquina utilizadas na soldagem.  
Arame Aço Inoxidável AWS A5.9 ER308L

Parâmetros de Máquina	Faixa de Valores
Tensão	15 – 29 (V)
Corrente	100 – 300 (A)
Deposição	1,6 – 7,5 (kg/h)
Gás de Proteção	Ar

Fonte: Adaptado de ESAB (2021).

### 3.4 OBTENÇÃO DOS CORPOS DE PROVA

#### 3.4.1 Material de base

Para realizar as paredes, é necessário implementar um material de base para o início da deposição metálica, portanto, utilizou-se seis peças de aço inoxidável 304, medindo 40 x 150 x 4,75 mm, que deve ser afixado a bancada para dar início aos cordões de solda.

No substrato foram realizados testes prévios, e posteriormente, aplicados para confecção da parede de solda.

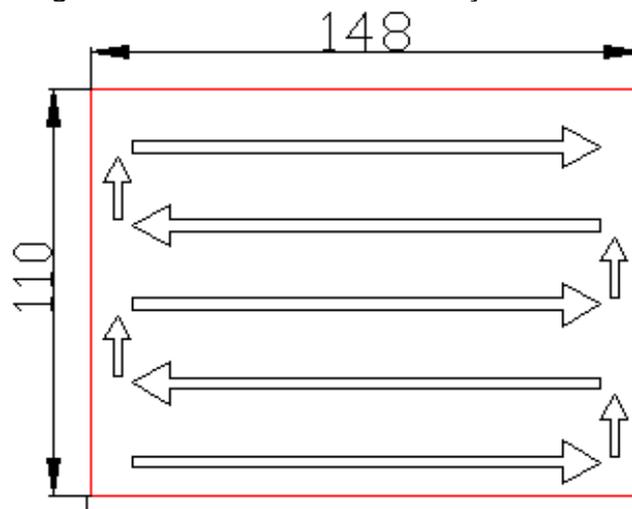
Após a deposição metálica, o material de base é retirado da parede e descartado.

### 3.4.2 Programa CNC e parede de solda

Para a execução da parede é necessário executar um programa CNC, que para este caso não é preciso passar por desenho em software 3D e software de fatiamento de camadas, uma vez que a parede a se executar é de simples complexidade de caminho.

Para realização dos experimentos práticos, foram projetadas paredes que possuem dimensões suficientes para extrair os corpos de prova. Na programação da estratégia de deposição de metal pelo processo de manufatura aditiva foi usado a medida de 6 mm de distância entre tocha e a cordão aplicado. As camadas foram projetadas seguindo a indicação conforme as setas mostradas na Figura 4.

Figura 4: Parede de solda de aço inox.



Fonte: Do Autor (2021).

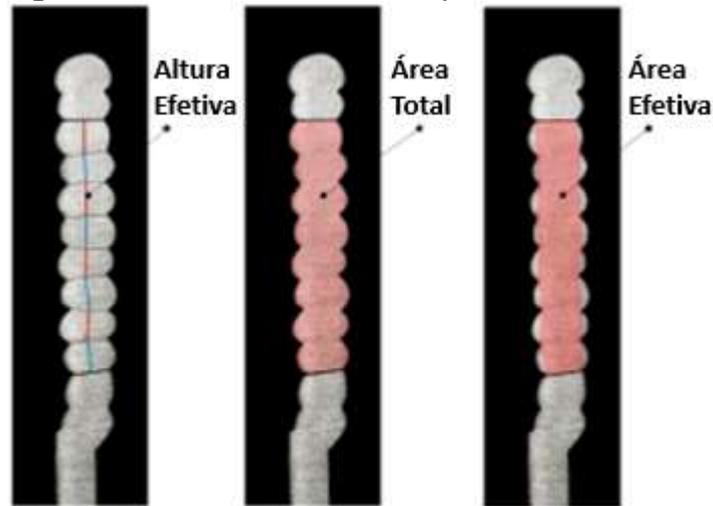
### 3.4.3 Análise do metal depositado

Para avaliar o número de cordões através da contagem de camadas e a geometria da seção das paredes utilizando de instrumentos de medição, foi considerado apenas a região central do metal depositado, desconsiderando a camada superior e inferior para uma melhor regularidade de resultados.

Entre os itens analisados, estão a altura efetiva da parede, que é a soma das alturas individuais de cada camada; altura média de camada (divisão da altura efetiva por números de camadas); fator de eficiência (%) de material (relação entre área efetiva e área total); largura total e efetiva, conforme representado na Figura 5.

A área total representa o produto da altura efetiva com a largura total das camadas. A área efetiva apresenta a multiplicação da altura efetiva com a espessura máxima de material desejado, ou seja, o que irá entregar após o acabamento, mostrando o valor em % que será aproveitado de material bruto.

Figura 5: Análise do cordão depositado.



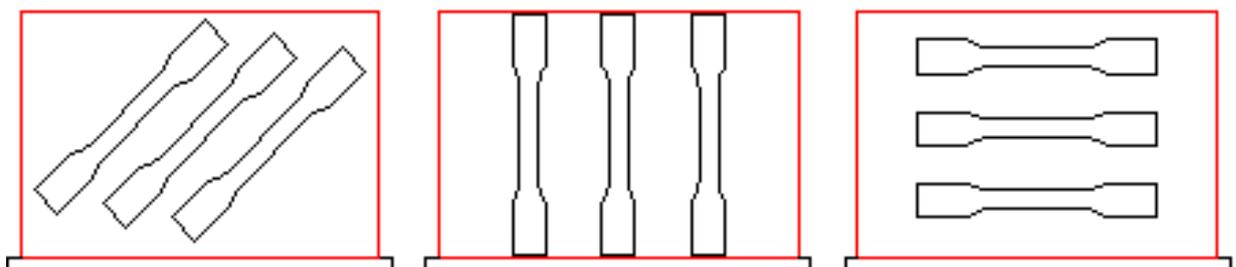
Fonte: Adaptado de (KOVALENKO, 2019).

### 3.4.4 Corpo de prova

Para extração da quantidade necessária de corpos de prova, foram projetadas três paredes de aproximadamente 100 x 150 mm, implementadas realizando o mesmo procedimento, caminho e etapas. Onde é considerado as paredes e os cordões para análise, e posterior a extração para os ensaios de tração e microdureza.

Para os ensaios de tração, a subdivisão se dá em corpos de prova horizontais, verticais e a 45°, conforme Fig. 6.

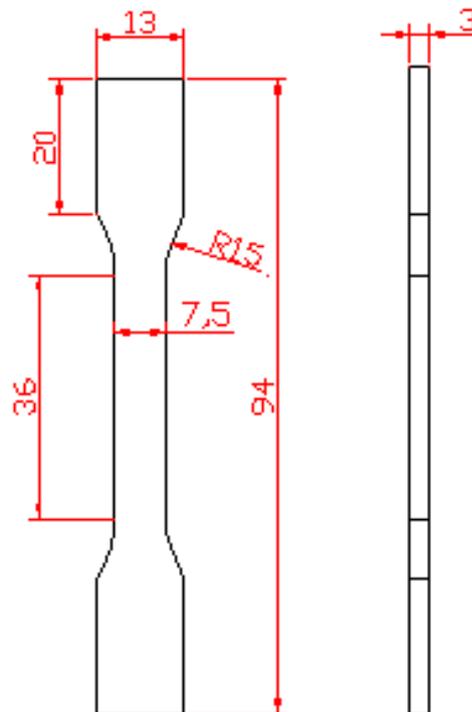
Figura 6: Corpos de prova enquadrados na parede de solda.



Fonte: Do Autor (2021).

Devido às limitações de altura do fuso do braço CNC da máquina de manufatura aditiva que realiza o caminho de deposição, os corpos de prova para o ensaio de tração foram obtidos com limitação nas suas dimensões, adaptado a norma ASTM E8, como mostra a Figura 7.

Figura 7: Dimensões do corpo de prova.



Fonte: Do Autor (2021).

### 3.5 CARACTERIZAÇÃO MECÂNICA

#### 3.5.1 Ensaio de tração

A máquina utilizada para o ensaio de tração é da marca EMIC, modelo DL 10000 com capacidade máxima de 100 KN e velocidade de ensaios de 5,0 mm/min.

#### 3.5.2 Ensaio de microdureza

Os ensaios de microdureza *Vickers* (HV) foram executados conforme a norma ASTM E18 (2017) utilizando um microdurômetro modelo HMV-2TADW da marca SHIMADZU®. Nas medições nos corpos de prova foram efetuadas cinco medições na face e na seção da parede de solda, com força de 4,903 N.

## 4 RESULTADOS E DISCUSSÕES

### 4.1 PARÂMETROS DE MÁQUINA

Após os testes prévios, foram encontrados os parâmetros ideais de soldagem para a execução das paredes, conforme mostrado na Tabela 3.

Tabela 3: Propriedades de máquina utilizadas na soldagem.  
Arame Aço Inoxidável AWS A5.9 ER308L

Parâmetros de Máquina	Valores
Tensão	25 (V)
Corrente	200 (A)
Deposição	2,5 (kg/h)
Gás de Proteção	Ar

Fonte: Do Autor (2021).

Para os itens da Tabela 3, com exceção do gás de proteção, foi considerado variação de 10%, devido ao ajuste fino realizado em cada parede de solda.

### 4.2 PEÇAS MANUFATURADAS EM AÇO INOX

Com o objetivo de obter um número mínimo de camadas atingindo uma altura máxima da parede, conforme os eixos da máquina de manufatura aditiva poderiam proporcionar, buscando deposição o mais homogêneo possível e com molhabilidade de 90°.

#### 4.2.1 Análise das paredes

Para as três paredes construídas, foram mantidos os mesmos valores de soldagem, havendo alterações mínimas entre as paredes devido aos ajustes finos de máquina e em posição do substrato. Foi buscado manter os valores o mais próximo possível para obter uma uniformidade maior nas paredes e nos resultados analisados, como mostra uma das paredes executadas na Fig. 8

Figura 8: Deposição metálica de aço Inox 304L.



Fonte: Do Autor (2021).

Inicialmente nota-se que as camadas não ficaram totalmente paralelas ao material de base, como pode-se verificar na Parede 1 apresentada na Fig. 9., principalmente no início do processo, devido ao fato do substrato se deformar de forma convexa ao meio da parede, ocorrendo assim maior fusão nas sobreposições de camada nas extremidades dos cordões.

As paredes obtiveram variação entre altura e quantidade de cordões realizados, conforme mostra a Figura 9.

Figura 9: Características das peças manufacturedas.



Fonte: Do Autor (2021).

Pode-se observar como média dimensional: 146 x 99 x 6,1 mm, com média de cordões depositados de 33 cordões.

#### 4.2.2 Análise dos cordões

Os cordões apresentaram homogeneidade de acordo com o esperado, observando que o procedimento de deposição se deu com cordões contínuos, as seções transversais das paredes mostraram fusão total entre as camadas, não apresentando defeitos de soldagem individuais.

Na sequência foi caracterizada as geometrias processadas conforme Tabela 4, e de acordo com a metodologia já descrita.

Tabela 4: Caracterização das dimensões.

	Número de Camadas	Altura Efetiva (mm)	Altura Média das Camadas (mm/camada)	Largura Média Total (mm)	Largura Média Efetiva (mm)	Área Total (mm <sup>2</sup> )	Área Efetiva (mm <sup>2</sup> )	Fator de Eficiência (%)
Parede 1	29	88,0	3,0	6,40	3,40	563,2	299,2	53
Parede 2	31	92,0	3,0	6,10	3,30	561,2	303,6	54
Parede 3	33	97,0	2,9	5,90	3,00	572,3	291,0	51
Média	31	92,3	3,0	6,1	3,2	565,6	297,9	53

Fonte: Do Autor (2021).

Como citado, o valor entre cordão e tocha pré-definido é de 6,0 mm, e com o valor de altura média das camadas em 3,0 mm/camada, nos entrega que se obtém aproximadamente 1,5 mm de fusão entre cordões depositados. O menor valor de eficiência da parede 3 se deu devido a uma falha de processo em um dos cordões, devido à dificuldade de soldagem deste material, como mostra a Figura 10.

Figura 10: Falha de deposição.



Fonte: Do Autor (2021).

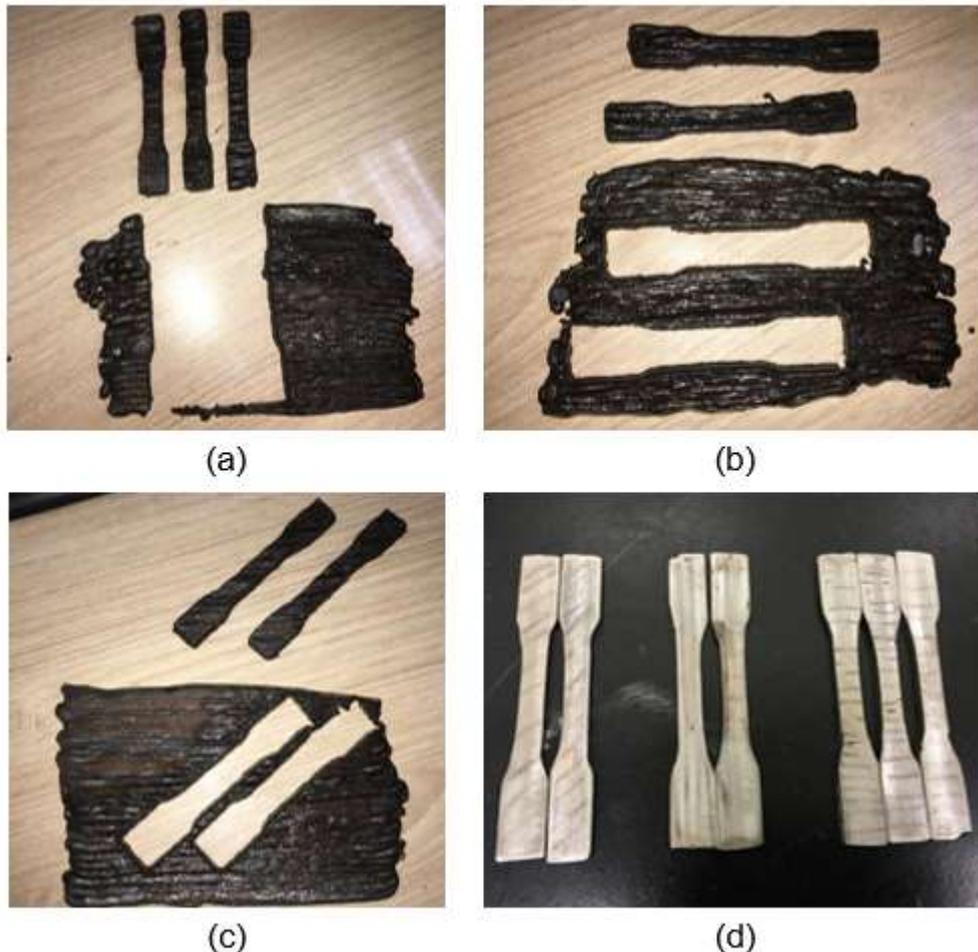
### 4.3 EXTRAÇÃO DOS CORPOS DE PROVA

Para facilitar e agilizar o processo, foi utilizado um Plasma CNC que realizou o corte preciso dos corpos de prova.

Devido às dimensões finais das deposições, foi possível a extração de somente dois corpos de prova em cada parede no sentido vertical e a 45° em relação aos cordões.

A usinagem se fez necessária para retirada das irregularidades da face e obtenção da espessura ideal de ensaio, para melhores resultados e possíveis comparações entre os sentidos dos corpos de prova nos ensaios mecânicos, adotou-se o valor de 3 mm de espessura para todos os corpos de prova devido ao valor de largura efetiva citado anteriormente. Os corpos de prova estão mostrados na Fig. 11.

Figura 11: Extração dos corpos de prova para ensaio de tração em diferentes sentidos com relação aos cordões: (a) perpendicular, (b) paralelo, (c) oblíquo, (d) corpos de prova usinados.

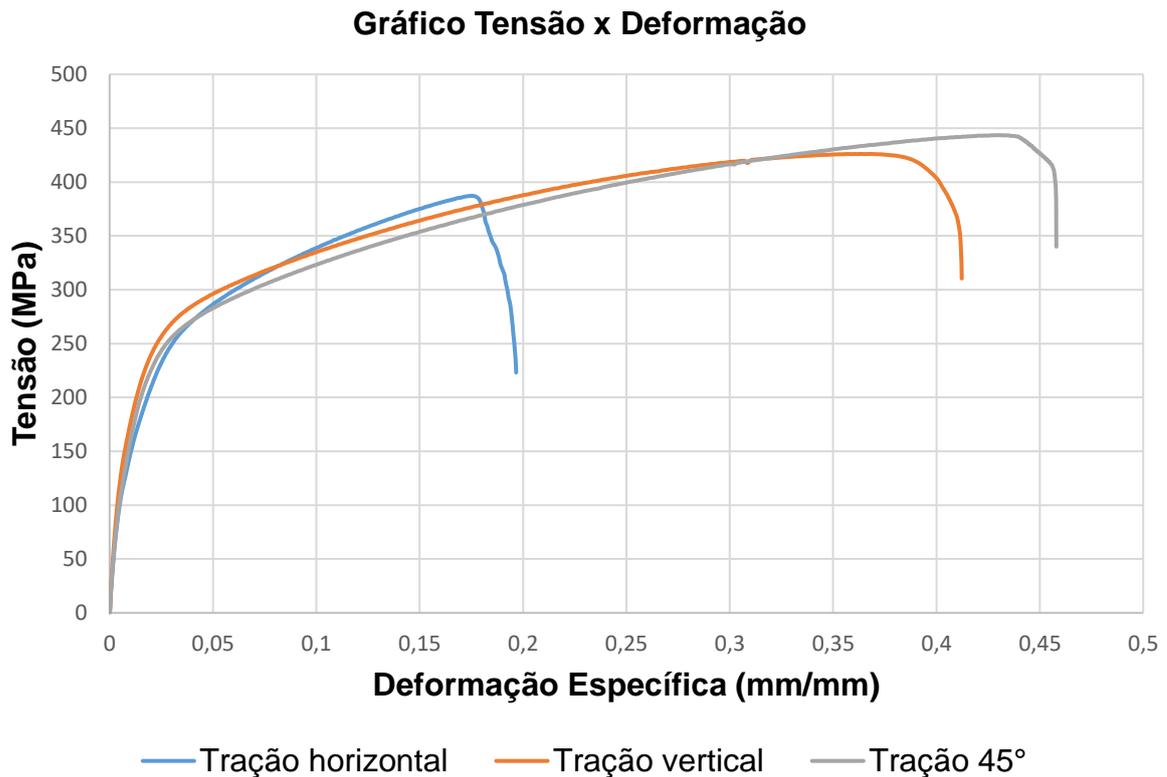


Fonte: Do Autor (2021).

#### 4.4 ENSAIO DE TRAÇÃO

Foram realizados os ensaios de tração nos corpos de prova, onde obteve-se uma média dos valores em cada direção de soldagem, os resultados podem ser observados na Figura 12.

Figura 12: Gráfico Tensão x Deformação dos corpos de prova em diferentes sentidos.



Fonte: do Autor (2021).

De acordo com o gráfico mostrado na Figura 12, os principais resultados para cada amostra estão apresentados na Tabela 5.

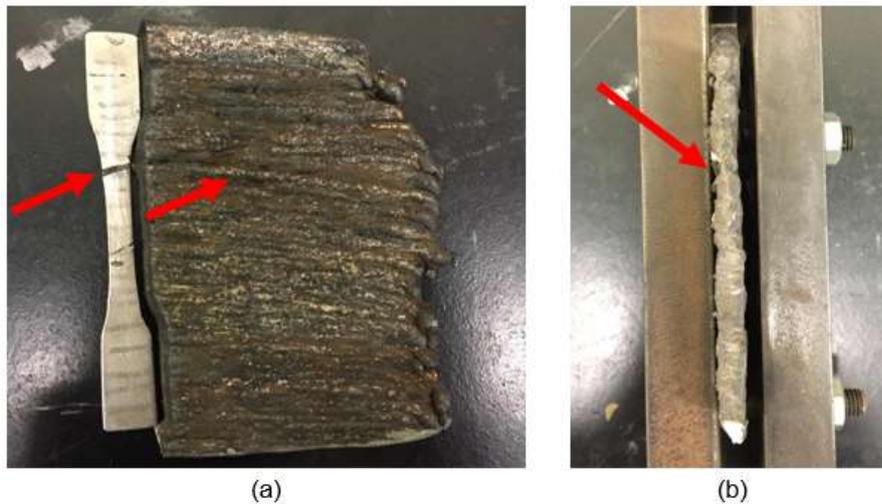
Tabela 5: Resultados numéricos do ensaio de tração.

Ensaio	Tensão Máxima $\sigma$ Máx [Mpa]	Tensão Escoamento $\sigma_e$ [Mpa]	$\epsilon$ [mm/mm]
Horizontal	387,10	116,00	0,19
Vertical	426,60	140,80	0,41
45°	444,70	124,90	0,46

Fonte: do Autor (2021).

Para o ensaio realizado nos corpos de prova com solda em horizontal, foi considerado somente o resultado de um ensaio, os demais não obtiveram valores aceitáveis pelo fato da ruptura precoce, constatado por falha no local de deposição da parede, conforme mostra Fig. 13.

Figura 13: Falha de deposição no corpo de prova extraído horizontalmente: (a) visualização na face da parede, (b) visualização na seção da parede.



Fonte: do Autor (2021).

Observando os resultados, os corpos de provas extraídos com cordões na horizontal tornaram o material muito frágil, com trincas aparentes e facilidade de rompimento no ensaio de tração se comparado as demais direções.

O meio de extração dos corpos de prova que obteve maiores resultados foi o de direção a 45° em relação aos cordões, com valores de tensão 4,1% maiores que os extraídos em direção vertical.

O valor de tensão máxima conforme norma AISI/UNS para o aço inox 304L é de 515 MPa, apenas 15,8% maior que o valor máximo obtido nos ensaios.

O limite de escoamento do inox 304L segundo norma AISI/UNS é de 210 MPa, valor 49,1% maior que o valor máximo encontrado no ensaio, indicado pelo fato da construção se dar por soldagem, e a deformação inicial acontecer nas ligações entre os cordões da parede.

#### 4.5 ENSAIO DE DUREZA

Na Tabela 6 estão ilustrados os valores de microdureza da parede de solda.



Tabela 6: Resultados dureza em *Vickers*.

<b>Tipo de Análise</b>	<b>Média (HV)</b>	<b>Desvio Padrão</b>
Seção	165,70	3,70
Face	212,20	16,30

Fonte: do Autor (2021).

O valor de dureza *Vickers* segundo a norma AISI/UNS para o aço inox 304L é de 155 HV, valor 6,4% menor que o encontrado para o ensaio realizado na seção da parede. O valor da face encontrado é de 26,9% maior. Para a média dos valores dos ensaios na face e na seção, que é de 188,8 HV, com 17,9% de diferença para o valor de referência utilizado. A discrepância encontrada no resultado da face da parede se dá pelo fato de na parte externa do procedimento de soldagem ocorrer um tratamento térmico, ocasionado pelo resfriamento mais rápido.

## 5 CONCLUSÕES

Portanto, após as análises dos resultados, pode-se concluir que:

- O método utilizado para realizar a parede pode ser validado por ter obtido boa fusão nas camadas depositadas, uniformidade nos cordões e nas paredes executadas;
- Valores de referência para a máquina na deposição metálica do aço inox 304L foram encontrados após os testes prévios, havendo pequenas variações consideradas apenas como ajuste fino;
- A curva característica de resistência ao ensaio de tração encontrada para os corpos de prova foi avaliada de maneira satisfatória, principalmente para os corpos de prova extraídos no sentido vertical e oblíquo em relação aos cordões da deposição metálica;
- A microdureza média encontrada se mostrou próxima dos valores considerados como referência.
- Tendo valores próximos de tensão, dureza e boa soldabilidade no processo de fusão localizada, o procedimento de manufatura aditiva pode ser validado para utilização do aço inox 304L.



Após a conclusão desta pesquisa, sugere-se trabalhos futuros envolvendo este tema:

- Analisar o aporte térmico na poça de fusão, substrato, interpasse e o acúmulo de calor depositado, bem como implantar um método de resfriamento durante o processo de deposição metálica visando maior uniformidade dos cordões;
- Realizar cordões em ambos os lados do material base, visando uma melhor construção dimensional da parede, buscando uma mesma altura de parede, porém com menos cordões de solda, assim analisando suas medidas efetivas;
- Elaborar paredes paralelas buscando uma peça com dimensões maiores, buscando possíveis defeitos no seu interior;
- Realizar peças com geometrias mais complexas e aplicáveis na vida real, fazendo a caracterização dos materiais em diferentes pontos da peça;
- Executar ensaio não destrutivo de líquido penetrante para identificar possíveis defeitos na deposição metálica;
- Implementar tratamento térmico buscando melhores características mecânicas;
- Observar a microestrutura na seção da parede, analisando diferenças entre o meio do cordão e a ligação entre os mesmos, comparando com valores de referência;
- Verificar a viabilidade econômica para aplicação deste método de fabricação.

## REFERÊNCIAS

ALBERTI, Eduardo André; BUENO, Bruno Machado Pereira; D'OLIVEIRA, Ana Sofia C. M. **Processamento de ligas de níquel com técnica de manufatura aditiva utilizando plasma por arco transferido**, 2015.

ALBERTI, Eduardo André; SILVA, Leandro João Da; D'OLIVEIRA, Ana Sofia C. M. **Manufatura Aditiva: o papel da soldagem nesta janela de oportunidade**, 2014.

ARTAZA, T.; ALBERDI, A.; MURUA, M.; GORROTXATEGI, J.; FRÍAS, 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**, 2017.



CAMPATELLI, Gianni; MONTEVECCHI, Filippo; VENTURINI, Giuseppe; INGARAO, Giuseppe; PRIARONE, Paolo C. **Integrated WAAM-Subtractive Versus Pure Subtractive Manufacturing Approaches: An Energy Efficiency Comparison**, 2020.

CERQUEIRA, J. L. Prado; DIÉGUEZ, J. L.; CAMACHO, A. M. **Preliminary development of a Wire and Arc Additive Manufacturing system (WAAM)**, 2017.

CERQUEIRA, José Luis Prado; CAMACHO, Ana María; DIÉGUEZ, José Luis; RODRÍGUEZ-PRIETO, Álvaro; ARAGÓN, Ana María; LORENZO-MARTÍN, Cinta; GIL, Ángel Yanguas. **Analysis of favorable process conditions for the manufacturing of thin-wall pieces of mild steel obtained by wire and arc additive manufacturing (WAAM)**, 2018.

CUNNINGHAM, C. R.; WIKSHÅLAND, S.; XU, F.; KEMAKOLAM, N.; SHOKRANI, A.; DHOKIA, V.; NEWMAN, S. T. **Cost Modelling and Sensitivity Analysis of Wire and Arc Additive Manufacturing**, 2017.

ERIKSSON, Magnus; LERVÅG, Malin; SORENSEN, Camilla; ROBERTSTAD, Andreas; BRONSTAD, Bård M.; NYHUS, Bård; AUNE, Ragnhild; REN, Xiaobo; AKSELSEN, Odd M. **Additive manufacture of superduplex stainless steel using WAAM**, 2018.

ESAB, **Catálogo de consumíveis**, 2020.

ESAB; FORTES, C.; VAZ, Cláudio Turani. **Soldagem MIG / MAG**, 2005.

GUIMARÃES, Rodrigo Freitas. **Avaliação Comparativa dos Linings de aços AISI 444 e AISI 316L para aplicação em Torres de Destilação**, 2005.

HORGAR, A.; FOSTERVOLL, H.; NYHUS, B.; REN, X.; ERIKSSON, M.; AKSELSEN, O. M. **Additive manufacturing using WAAM with AA5183 wire**, 2018.

iCrowd Newswire, **Mercado de manufatura aditiva projetada para registrar 17,7% cagr para 2027-key player 3d systems, stratasys, arcam ab, eos, 3t rpd e envisiontec**. Disponível em: <https://icrowdpt.com/2019/08/21/mercado-de-manufatura-aditiva-projetada-para-registrar-177-cagr-para-2027-key-player-3d-systems-stratasys-arcam-ab-eos-3t-rpd-e-envisiontec/>. Acessado em 02 de setembro de 2020.

KARMUHILAN, M.; SOOD, Anoop Kumar. **Intelligent process model for bead geometry prediction in WAAM**, 2018.

KNEZOVIĆ, Nikola; TOPIĆ, Angela. **Wire and Arc Additive Manufacturing (WAAM) – A New Advance in Manufacturing**, 2019.

KOVALENKO, Oksana. **Avaliação De Aspectos Da Estabilidade Do Arco E Da Geometria De Pré-Formas Em Manufatura Aditiva Utilizando O Processo Mig / Mag Cmt Com Foco Na Liga Ti-6Al-4V**, 2019.



MAIA ABREU, Cleyde Evangelista et al. **Indústria 4.0: Como as Empresas Estão Utilizando a Simulação para se Preparar para o Futuro**, 2018.

MASUCH, **Produtos de Consumo e Eletrônicos cada vez mais Importantes para o Mercado de MA**. Disponível em: <https://fon-mag.de/industry-news/2020/05-wohlers-report/?L=1>. Acessado em 02 de setembro de 2020.

MÜLLER, Johanna; GRABOWSKI, Marcel; MÜLLER, Christoph; HENSEL, Jonas; UNGLAUB, Julian; THIELE, Klaus; KLOFT, Harald; DILGER, Klaus. **Design and parameter identification of wire and arc additively manufactured (WAAM) steel bars for use in construction**, 2019.

PAMPLONA, GUILHERME ROBERTO. **Parametrização e Análise da Soldagem MIG/MAG Convencional para a Manufatura Aditiva Utilizando Refrigeração Forçada**, 2018.

SILVA, Fernando Lucas dos Santos e. **Desenvolvimento de Estratégias para Manufatura Aditiva via Soldagem a Arco**, 2017.

SILVA, Maria Inês Castro e; ASSUNÇÃO, Eurico Gonçalves; ALMEIDA, Maria Luísa Coutinho Gomes De. **Study of Deposition Strategies of a Wire + Arc Additive Manufactured Component Materials Engineering Examination Committee**, 2018.

TADEU, Hugo Ferreira Braga; SANTOS, Eduardo Stock Dos. **O que seria a Indústria 4 .0?**, 2016.

TIANJIN, **Golden Bridge Welding Materials Group Co**. Disponível em: <http://en.tjgoldenbridge.com/Actions/ProductDetail.aspx?id=32>. Acesso em: 04 de Outubro de 2020.

WANG, Tingting; ZHANG, Yuanbin; WU, Zhihong; SHI, Chuanwei. **Microstructure and properties of die steel fabricated by WAAM using H13 wire**, 2018.

YANG, Dongqing; WANG, Gang; ZHANG, Guangjun. **Thermal analysis for single-pass multi-layer GMAW based additive manufacturing using infrared thermography**, 2017.

ZIMMERMANN, Juliana Ilha; BOND, Danielle. **Utilização do processo de soldagem arco submerso para manufatura aditiva**. Seminário De Iniciação Científica, 2016.