

FABRICAÇÃO DE PEÇAS METÁLICAS POR MANUFATURA ADITIVA EM AÇOS COM BAIXO TEOR DE CARBONO

Data de aceite: 01/07/2024

Henrique Cechinel Casagrande

Anderson Daleffe

Carlos Antônio Ferreira

Daniel Fritzen

Gilson De March

Jovani Castelan

Lirio Schaeffer

RESUMO: Novas tecnologias surgem com o objetivo de melhorar processos de fabricação, bem como tornar os setores produtivos mais competitivos. No entanto, no último século, um novo método surgiu dentro da indústria 4.0 denominada de “Manufatura Aditiva”, ou MA. Neste novo contexto, as peças são impressas com objetivo de economizar matéria-prima e, desenvolver geometrias complexas, onde outras técnicas de fabricação não possuem essa habilidade. Dessa forma, uma máquina híbrida foi desenvolvida, juntando um aparelho de soldagem a arco e um equipamento controlado por computador (CNC). A máquina de soldagem

é da fabricante IMC, modelo DIGIplus A7 semiautomática, e o equipamento responsável por realizar os movimentos de deposição é um dispositivo de fabricação interna com deslocamentos em três eixos. O material utilizado para confecção dos corpos de prova foi o arame de soldadura ER70S-6, material este caracterizado por sua grande comercialização na indústria devido sua aplicabilidade e custo benefício. Dessa forma, paredes foram impressas para ensaio mecânico de tração em três sentidos em relação a deposição; 0°, 45° e 90°, para avaliação anisotrópica do material, bem como análise microestrutural e de microdureza. A avaliação microestrutural apresentou resultado característico de um aço com baixo teor de carbono, e com estrutura uniforme livre de porosidade. Em contra partida, o ensaio de tração mostrou um material de característica dúctil e com tensões máximas entre 555 a 530 MPa. Já no ensaio de microdureza Vickers, o material apresentou uniformidade no perfil de dureza, apresentando baixo desvio padrão e com durezas entre 150,5 á 160 HV.

PALAVRAS-CHAVE: Manufatura aditiva, soldagem a arco, indústria 4.0, aço carbono.

INTRODUÇÃO

A necessidade é conhecida como a mãe das invenções. Muitos pesquisadores descobrem novos modelos de trabalho, novas tecnologias, entre outras ideias, utilizando-se da necessidade de evolução do ser humano em seu meio existencial. Assim sendo, a indústria metal mecânica evolui a cada dia e se torna mais competitiva no mercado de trabalho que exige ao extremo produtos de qualidade, custo competitivo e sustentabilidade. Em contra partida o processo de produção utilizando-se a técnica de manufatura aditiva ganhou espaço no mercado, pois reduz o desperdício de material e desenvolve peças de grande complexidade. Essa técnica, foi desenvolvida no ano de 1981, no Japão e cresce a cada ano [1]

Este método utiliza a combinação de material soldado a arco e matéria-prima. Pode ser chamado de Wire and Arc Additive Manufacturing (WAAM) e ser implantado nas soldagens a arco de metal a gás (GMAW), ou até mesmo em soldagens com eletrodo de tungstênio (GTAW) e, a arco por plasma (PAW). Ressalta-se a quantidade de material depositado, pois com este método é possível ter altas taxas de deposição, entretanto, perde em poder de precisão e estética [2,6,8].

Salienta-se o uso de metais tais como titânio e aços, que possuem uma grande demanda de fios padrões e boas taxas de deposições, contudo, estudos aplicando alumínio ganham força no mercado. Não obstante, essa técnica tem suas desvantagens, tais como; uma elevada entrada de calor, resultando em tensões residuais e distorções, bem como menor precisão e rugosidade, que ao final do processo se torna necessário uma etapa de usinagem [3,4,7].

Para a confecção das peças, é necessário realizar teste de deposição de matéria-prima, o que se torna essencial para uma boa deposição e uniformidade entre as camadas depositadas. Parâmetros como taxa de alimentação do arame, velocidade de movimento da tocha, bem como intensidade de corrente e tensão [5].

Portanto, através da técnica de WAAM, ou fabricação aditiva por arco de arame, peças foram impressas para caracterização mecânica, avaliação anisotrópica do material, bem como avaliação química da composição do arame em estudo.

MÁQUINA DE MANUFATURA ADITIVA

O equipamento utilizado é uma junção entre máquina de soldagem a arco e dispositivo com coordenadas CNC (Centro Numérico Computadorizado). A máquina de soldagem é da fabricante IMC sendo seu modelo DIGIplus A7. Este equipamento por sua vez possui uma ferramenta de aquisição de dados capaz de fornecer em tempo real os parâmetros utilizados durante o processo de fabricação das peças. A Figura 1, detalha o equipamento utilizado no processo de soldagem.

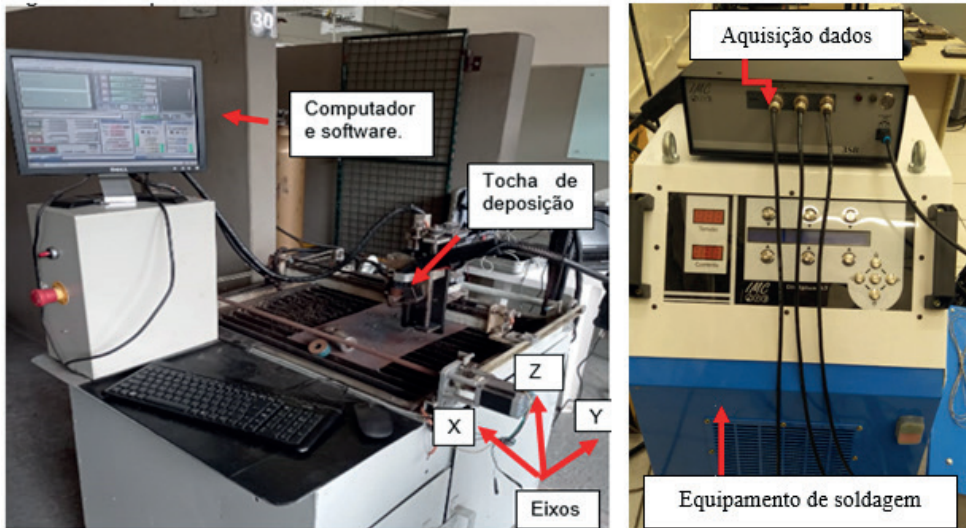


Figura 1: Equipamento de manufatura aditiva. Do autor (2024).

O software utilizado para programar é o MACH 3, em linguagem de programação G. O programa é feito de forma manual, pois o objetivo inicial é entender o comportamento metalúrgico das peças depositadas, e não a fabricação de peças com grande complexidade. Assim, ao equipamento de coordenadas CNC possui movimentação em três eixos, cognominado de X, Y e Z, conforme Figura 1.

Arame ER70S-6

O material para o presente estudo foi o arame de aço com baixo teor de carbono ER70S-6 com 1 mm de espessura e com 15 kg fornecido em bobina. Este material é regido pela norma AWS 5.18. Para caracterização dos elementos químicos presentes na estrutura, foi realizado o ensaio de espectrometria de emissão óptica, conforme Tabela 1.

Composição química	Valores % em peso
Carbono (C)	0,104
Silício (Si)	0,657
Manganês (Mn)	1,259
Fósforo (P)	0,014
Enxofre (S)	0,010
Cromo (Cr)	0,020
Molibdênio (Mo)	0,014
Níquel (Ni)	0,014
Cobre (Cu)	0,093
Ferro (Fe)	bal.

Tabela 1: Composição química arame AWS ER70S-6.

Fonte: Do autor (2024).

Conforme Tabela 1, o nível de carbono é considerado baixo, no entanto outros elementos se fazem presentes na estrutura, tais como Silício com 0,657 % em peso, bem como o manganês com 1,259 %.

Parâmetros de soldagem

Conforme citado anteriormente, para produção das amostras foi utilizado a máquina de soldagem da fabricante IMC, com a ferramenta de aquisição de dados SAP3RS. Contudo, essa ferramenta é capaz de obter os seguintes parâmetros: corrente (A), tensão (V), velocidade de arame (m/min.), vazão do gás de proteção (L/min.), entre outros. A Figura 2 detalha os gráficos obtidos na impressão das amostras.

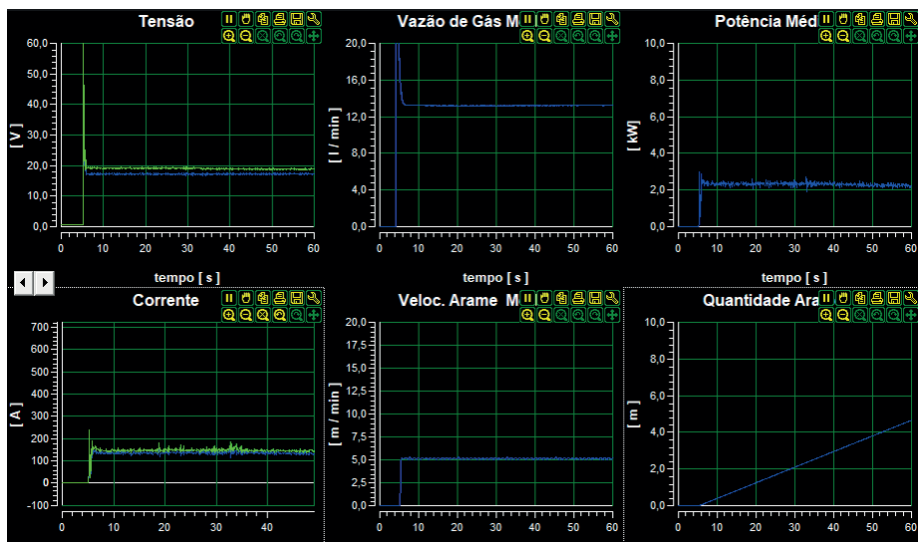


Figura 2: Aquisição dos parâmetros de soldagem. Do autor (2024).

Os valores da Tabela 2 são referentes aos resultados da Figura 2. Os resultados apresentados são a média aritmética.

Composição química	Valores
Corrente (A)	123
Tensão (V)	17,4
Velocidade gás (L/min.)	13,4
Velocidade arame (m/min.)	5,1
Potência (KW)	2,1
Quantidade arame (m)	4,7

Tabela 2: Parâmetros de soldagem arame ER70S-6.

Fonte: Do autor (2024).

Os parâmetros utilizados na Tabela 2 fazem referência a fabricação de uma parede de soldagem. O gás utilizado como barreira protetiva foi uma mistura entre argônio (75%) e dióxido de carbono (25%), caracterizado como processo de soldagem MAG (Metal Ativo Gás). Já o material utilizado como substrato é uma chapa de aço SAE 1020 com dimensões de 150 x 75 x 6,35 mm.

Obtenção de peças para ensaio mecânico de tração

Peças manufaturadas foram desenvolvidas para analisar as camadas depositadas durante a impressão. Para isso, foram produzidas três paredes com aproximadamente 6 mm de largura, 120 mm de comprimento e 120 mm de altura. Após a impressão, essas paredes foram usinadas e retificadas utilizando-se a fresadora Romi U30, e a retífica plana Mello P36, respectivamente. Essa etapa é crucial para validar a homogeneidade em diferentes direções e para avaliar as tensões de trabalho, como tensão de escoamento, tensão máxima e alongamento, realizando assim uma análise anisotrópica. Para o aço carbono, esse tipo de ensaio segue a norma NBR ISO 6892. A Figura 3 traz as paredes impressas.

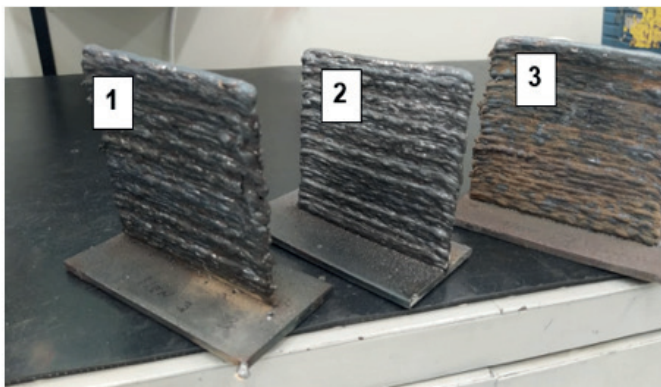


Figura 3: Paredes impressas com manufatura aditiva.

O Objetivo de produzir três paredes está ligado com a avaliação anisotrópica do material. Dessa forma, foram retirados seis corpos de prova na amostra de 0° e 90°. No entanto, para a parede de corte a 45° foi possível retirar apenas 5 amostras devido as limitações geométricas. A Figura 4 detalha os corpos de prova para ensaio de tração. O ensaio foi realizado em uma máquina de ensaios universal EMIC com carga de até 100 KN, e velocidade de ensaio com 5 mm/min.

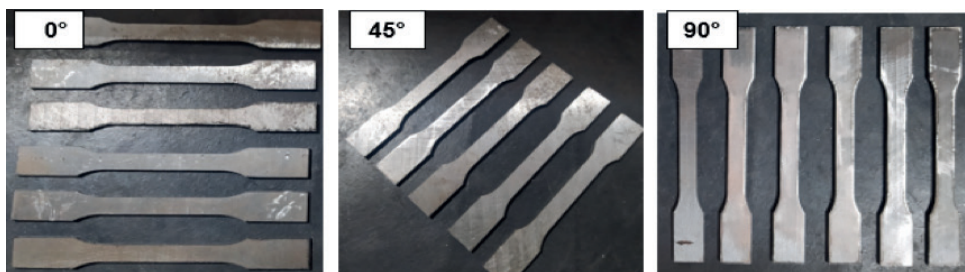


Figura 4: Corpos de prova para ensaio mecânico de tração.

A Tabela 3 detalha a quantidade de camadas depositadas, bem como as dimensões finais das paredes.

Parâmetros	Valores
Número de camadas	31
Altura efetiva	118 mm
Altura média camads	3,74 mm/camada
Largura média camadas	5,53 mm
Largura após usinagem	2 mm
Fator de eficiência	36,17 %

Tabela 3: Carecterísticas dos cordões

Fonte: Do autor (2021).

Análise metalográfica

As amostras foram submetidas a ensaio microestrutural através do microscópio Olympus modelo SC30, conforme norma ABNT NBR 15454. Conforme discutido, o processo de soldagem a arco pode apresentar porosidade, que quando exposto a esforços mecânicos podem ocorrer ruptura prematura.

Ensaio de microdureza Vickers

Para verificar a homogeneidade da dureza das paredes estudadas, foi conduzido um ensaio de dureza Vickers utilizando um microdurômetro modelo HMV-2TADW da marca SHIMADZE®. O estudo envolveu a realização de 17 penetrações ao longo de um perfil no sentido longitudinal (maior comprimento) e 8 penetrações no sentido transversal. Cada penetração foi realizada aplicando uma força de 4,903 N e uma distância de 1,5 mm. Os resultados foram analisados utilizando-se a Equação 1.

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

Onde:

Hv: Hardness Vickers (HV);

F: Carga aplicada (Kg);

d²: Distância entre as diagonais (mm).

ANÁLISES E RESULTADOS

Análise de metalografia

Este ensaio detalhou a microestrutura do material em estudo. A Figura 5 traz a metalografia que é composta de ferrita com a cor clara, apresentada como FE, a matriz também possui a perlita com cor escura denominada de PE, e a análise ainda apresentou perlita de contorno de grão PC.

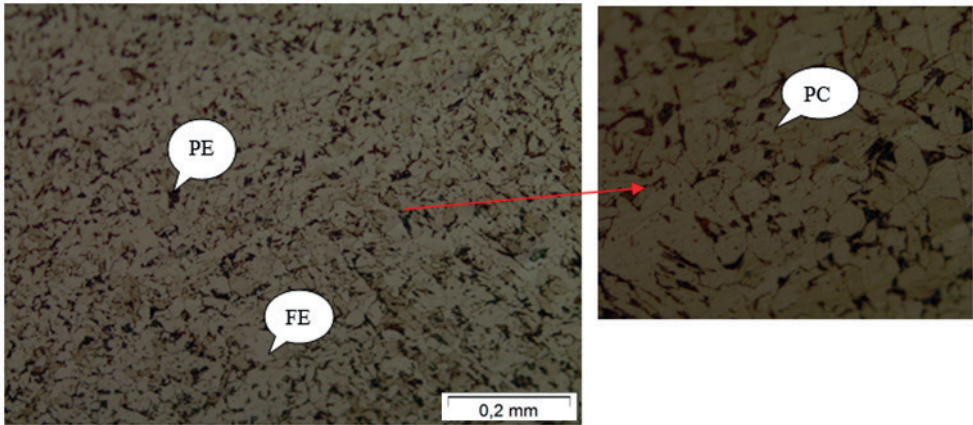


Figura 5: Metalografia das amostras. Do autor (2024).

Ensaio mecânico de tração

O ensaio mecânico de tração foi realizado em três sentidos para avaliação anisotrópica. A Figura 6 detalha tal ensaio. Nota-se um limite de escoamento visível, característico de um material dúctil.

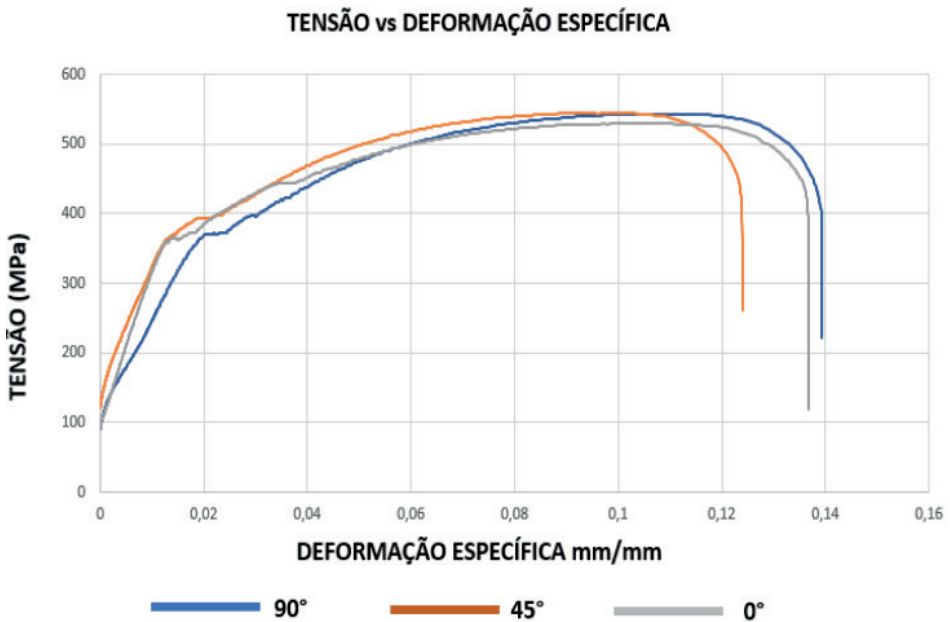


Figura 6: Ensaio mecânico de tração. Do autor (2024).

A tensão máxima suportada foi de 550 MPa em sentido de 90° em relação ao substrato de deposição. Contudo, não houve uma variação expressiva em relação aos três sentidos, conforme apresentado na Tabela 4.

Ensaio	Tensão máxima (MPa)	Tensão escoamento (MPa)	
Tração 90°	550	364	0,139
Tração 45°	544	390	0,124
Tração 0°	530	357	0,134

Tabela 4: Ensaio de tração em 0°, 45° e 90°

Fonte: Do autor (2024).

O ensaio a 45° mostrou com uma região de maior elasticidade, e apresentou o valor de limite de escoamento de 390 MPa, o valor maior entre os três sentidos. Ainda assim, o ensaio a 90° obteve a maior deformação específica, e apresentou 12% de deformação a mais em comparação ao resultado da amostra a 45°.

Ensaio de microdureza Vickers

Para o ensaio na longitudinal a dureza ficou com uma média de 160 HV, e com um desvio padrão de 7,46 HV. Nota-se um baixo desvio padrão entre as endentações, conforme visualizado na Figura 7.

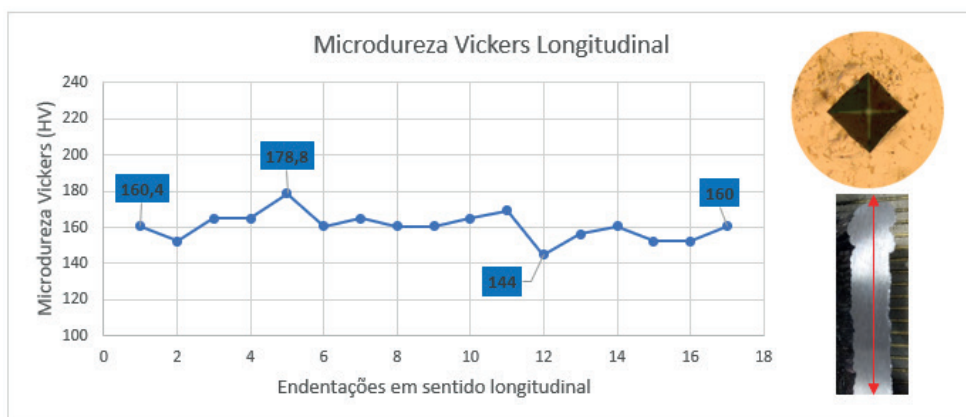


Figura 7: Ensaio de microdureza Vickers em sentido longitudinal. Do autor (2024).

No entanto, os resultados para o ensaio de microdureza em sentido transversal apresentaram uma dureza menor comparado ao resultado do sentido longitudinal. A Figura 8 detalha como ficou o respectivo gráfico.

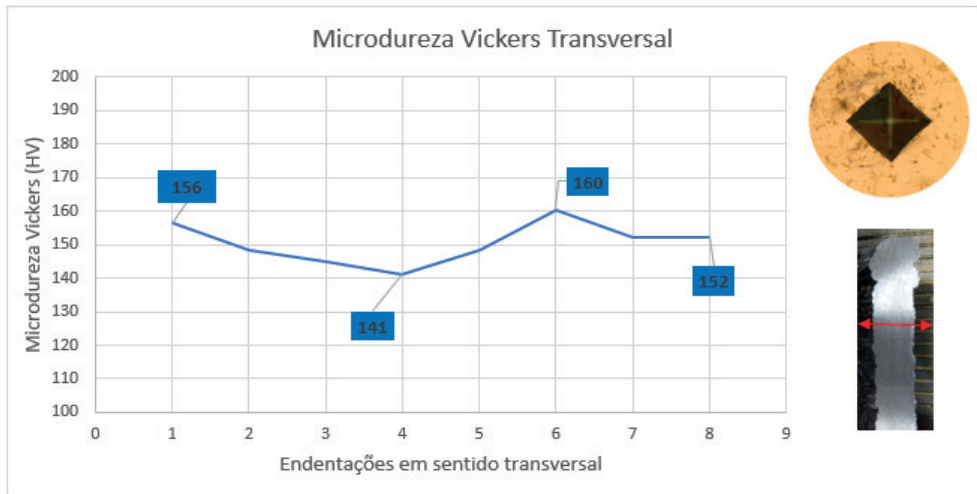


Figura 8: Ensaio de microdureza Vickers em sentido transversal. Do autor (2024).

A microdureza transversal possui média de 150,5 HV e desvio padrão de 6,15 HV. e apresenta 10 HV a menos em comparação com os resultados do sentido longitudinal. No entanto, vale ressaltar que para o sentido longitudinal por possuir uma região maior, foram realizadas 17 endentações, e para o sentido transversal 8 endentações. Outro motivo que pode ter influenciado no resultado é a troca térmica entre parede e ar atmosférico, sendo que para o ensaio no sentido longitudinal o perfil de dureza foi realizado ao longo do centro da parede, onde foi o último local a resfriar.

CONCLUSÃO

Portanto, após análise dos resultados conclui-se:

Este método se mostra promissor pois apresentou boa uniformidade em sua estrutura metalográfica. A matriz estrutural é composta de ferrita e perlita, sem apresentar grãos grosseiros característicos da área afetada pelo calor quando um material é soldado acima da temperatura crítica entrando na fase austenítica. Vale salientar que cada cordão depositado sofreu reaquecimento e conseqüentemente recozimento, influenciando em sua estrutura.

O ensaio de microdureza em sentido longitudinal obteve um desvio padrão baixo, com apenas 7,46 HV e uma média de 160 HV, contudo, o ensaio realizado em sentido transversal a deposição obteve uma dureza menor na extremidade do material (parede externa), e ficou com uma média de 150,5 HV com 6,15 HV de desvio padrão. A microdureza e metalografia apresentaram valores que comparado a literatura ficam com características entre um aço SAE 120 e SAE 1030.

O ensaio de tração obteve resultados com pequena variância, o que caracteriza uma penetração com eficiência entre as deposições dos cordões. As amostras ensaiadas a 45° se mostraram com menor deformação específica, com 12% a menos em comparação ao ensaio de 90° que teve maior deformação.

AGRADECIMENTOS

Os autores agradecem ao Centro Universitário – UNISATC pelo apoio a pesquisa através do uso de sua estrutura de laboratórios e a Fundação de Amparo à Pesquisa e Inovação do Estado de Santa Catarina – FAPESC pelo apoio financeiro na compra de equipamentos e insumos para pesquisa.

REFERÊNCIAS

1. 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.
2. 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>. Acesso em: 04 de abril de 2021.
3. HU, Daijun; GUO, Zixu; GRILLI, Nicoló; TAY, Aloysius; LU, Zhen; YAN, Wentao. **Understanding the strain localization in additively manufactured materials: Micro-scale tensile tests and crystal plasticity modeling**. International Journal of Plasticity 177 (2024). Disponível em: <<https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0749641924001086>>. Acesso em: 17 de junho de 2024.
4. 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>.
5. 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 de abril de 2021.
6. CAMPATELLI, Gianni; MONTEVECCHI, Filippo; VENTURINI, Giuseppe; INGARAO, Giuseppe; PRIARONE, Paolo. Integrated WAAMSubtractive 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 abril de 2021.
7. XIAO, Jinrui; ZHANG, Yiteng; XIE, Xincheng; DING, Wenfeng; ZHAO, Zhuan; LIANG, Zhongwei. **Mechanical property improvement of wire-arc additive manufactured 06Cr19Ni9 steel based on ultrasonic strengthening grinding process**. ScienceDirect, Journal of Materials Research and Technology 30 (2024) 7969-7980. Disponível em:<<https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S2238785424012274>>. Acesso em: 17 de junho de 2024.
8. LOPESA, Gustavo; FILHO, Demostenes; FERRARESI, Valtair. **Effect of interlayer temperature and cold wire addition in Wire Arc Additive Manufacturing on carbon steel**. Procedia Computer Science 232 (2024) 544–553. Disponível em:<<https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S1877050924000541>>. Acesso em: 17 de junho de 2024.