



ANÁLISE DAS CARACTERÍSTICAS MECÂNICAS DE ANISOTROPIA ATRAVÉS DO PROCESSO DE MANUFATURA ADITIVA EM AÇO DE BAIXO CARBONO

Bruno da Rosa Lopes¹

Anderson Daleffe²

Henrique Cechinel Casagrande³

Gilson de March⁴

Hadrian Martins⁵

Lirio Schaeffer⁶

Carlos Antônio Ferreira⁷

Resumo: Este estudo analisa as características mecânicas de anisotropia em aço de baixo carbono utilizando a técnica de Manufatura Aditiva por Arco de Arame (WAAM). O processo utilizou arame ER70S-6 depositado em chapas de aço SAE 1020, com parâmetros de soldagem definidos como: tensão de 189 V, corrente de 136 A, velocidade de alimentação do arame de 5,08 m/min, e vazão de gás de proteção de 13,4 L/min (mistura de 75% argônio e 25% dióxido de carbono). Os ensaios de tração revelaram que a orientação das camadas afeta as propriedades do material, com resistência máxima à tração de 429 MPa na orientação a 90° e maior alongamento, de 0,1388 mm/mm, na orientação a 0°. A análise de microdureza Vickers mostrou uma dureza média de 175 HV, indicando consistência na dureza ao longo das peças. A microestrutura apresentou predominância de ferrita e perlita, além de porosidades, atribuídas à rápida solidificação. Estes resultados confirmam a anisotropia do aço ER70S-6 processado por WAAM, enfatizando a necessidade de controle rigoroso dos parâmetros de soldagem para otimizar suas propriedades mecânicas. A pesquisa sugere que a técnica WAAM é adequada para aplicações industriais que exigem componentes metálicos complexos e duráveis.

Palavras-chave: Wire Arc Additive Manufacturing (WAAM), Manufatura Aditiva, Soldagem a Arco, Anisotropia.

1 INTRODUÇÃO

Na indústria metalúrgica, a matéria-prima metálica precisa passar por uma série de processos de fabricação para alcançar a forma geométrica desejada. Entre

¹ Mestrando em Engenharia Metalúrgica UniSATC E-mail: bruno_lopes@hotmail.com

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

³ Mestrando em Engenharia Metalúrgica UniSATC E-mail: henrique_cechinel@hotmail.com

⁴ Mestre em Engenharia Metalúrgica UniSATC E-mail: gilson.march@satc.edu.br

⁵ Graduando em Engenharia Mecânica UniSATC E-mail: hadrian.martins@satc.edu.br

⁶ Professor Dr. UFRGS. E-mail: schaefer@ufrgs.br

⁷ Doutorando em Engenharia de Minas, Metalurgia e Materiais. UFRG. E-mail: carlos.ferreira@satc.edu.br



esses processos, destacam-se a manufatura subtrativa e a manufatura aditiva. A manufatura aditiva (MA) foi introduzida no Japão por volta de 1981, com o propósito de criar objetos tridimensionais. Com o tempo, essa tecnologia se consolidou no mercado, principalmente devido à necessidade de fabricar peças complexas que os métodos convencionais não conseguem produzir, além de possibilitar a criação de protótipos com formas e geometrias intrincadas [1].

Este tipo de soldagem é reconhecido por sua eficiência e qualidade, superando em produtividade a soldagem manual com eletrodo revestido. Comercialmente, o processo é conhecido como MIG/MAG, onde o MIG (metal inert gas) refere-se ao uso de um gás que protege a poça de fusão contra contaminações atmosféricas, como oxigênio, nitrogênio e hidrogênio, enquanto o MAG (metal active gas) refere-se à utilização de gases que interagem com a poça de fusão. Os gases empregados podem ser argônio ou hélio, de origem atômica, ou CO₂, de origem molecular [2].

A técnica é especialmente adequada para materiais como aço e titânio, que se beneficiam do baixo custo do equipamento de soldagem, da disponibilidade de fios padrão e das elevadas taxas de deposição de material. Embora o uso de alumínio esteja em expansão, existem algumas limitações quando comparado a outros métodos de MA, como a alta entrada de calor, que pode causar tensões residuais e distorções, além de resultar em menor precisão e maior rugosidade, necessitando de um processo de usinagem para o acabamento final [3].

Alguns passos são essenciais para o sucesso desse processo, como a realização de testes para determinar os parâmetros ideais de soldagem, incluindo a intensidade da corrente, a taxa de alimentação do arame e a velocidade de movimento da máquina, além de planejar o caminho de deposição do material [4].

O processo de manufatura aditiva por arco de arame, conhecido como Wire and Arc Additive Manufacturing (WAAM), combina a técnica de soldagem a arco com o uso de arame como matéria-prima. Esse método é amplamente utilizado na soldagem a arco de metal a gás (GMAW) e também pode ser aplicado em soldagem a arco de tungstênio a gás (GTAW) e soldagem a arco por plasma (PAW) [5].

Neste cenário, esta pesquisa aplica o método WAAM (Wire Arc Additive Manufacturing), ou fabricação aditiva por arco de arame, para desenvolver peças que utilizem a menor quantidade possível de matéria-prima e que possam atender



grandes demandas do cotidiano. A técnica permite uma alta deposição de material e, ao final, as peças passam por um processo de usinagem para eliminar rugosidades e imperfeições.

De acordo com Campatelli et al [6], peças fabricadas por MA requerem a remoção de sua superfície inicial, que tende a apresentar um acabamento áspero.

2 MATERIAIS E MÉTODOS

O estudo será conduzido no Laboratório de Manufatura Aditiva do Centro Universitário UNISATC, que fornecerá todos os materiais necessários para os métodos discutidos nas seções subsequentes.

2.1. Material Utilizado

O estudo utilizou um arame de aço carbono de baixa liga AWS ER70S-6, com espessura de 1 mm, fornecido em bobinas de 15 kg. Este arame, que é a principal matéria-prima da pesquisa, tem sua composição química apresentada na Tabela 1.

Tabela 1: Composição química arame AWS ER70S-6 [7].

Composição química	Valores %
Carbono (C)	0,06 – 0,15
Silício (Si)	0,80 – 1,15
Manganês (Mn)	0,04 – 0,85
Vanádio (V)	Máx. 0,03
Fósforo (P)	Máx. 0,025
Enxofre (S)	Máx. 0,035
Cromo (Cr)	Máx. 0,15
Níquel (Ni)	Máx. 0,15
Molibdênio (Mo)	Máx. 0,15
Cobre (Cu)	Máx. 0,5

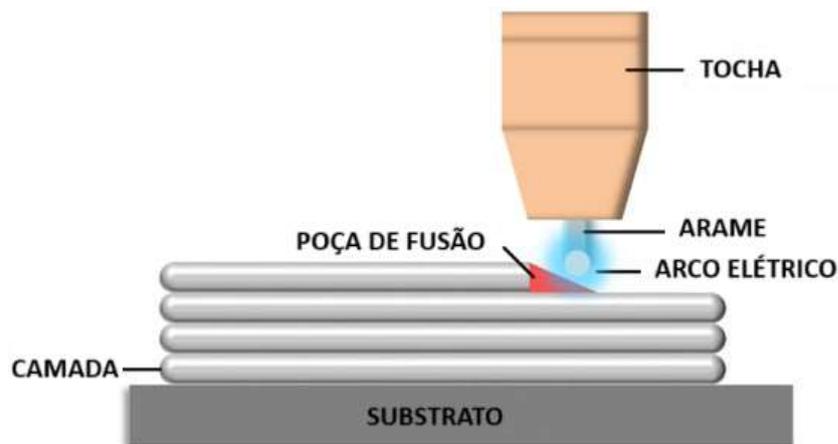
2.1.1 Material Base

Para fabricação das paredes é necessário utilizar uma chapa de substrato como base. Esse substrato foi escolhido em aço SAE 1020 nas dimensões 200 X 75 X 6 mm, por atender as medidas necessárias para desenvolver os corpos de provas.

2.2. Estratégia de deposição

A Figura 1 ilustra o processo de deposição utilizado na técnica WAAM (Wire Arc Additive Manufacturing) que foi utilizado. Nesse método, um arame metálico é alimentado através de uma tocha, onde um arco elétrico é formado entre o arame e o substrato, gerando calor suficiente para criar uma poça de fusão. O material derretido é depositado camada por camada, permitindo a construção de estruturas tridimensionais. A tocha é movimentada de forma controlada para garantir a precisão da deposição, solidificando rapidamente o material e formando a peça desejada, nesse caso, uma parede.

Figura 1: Estratégia de deposição.



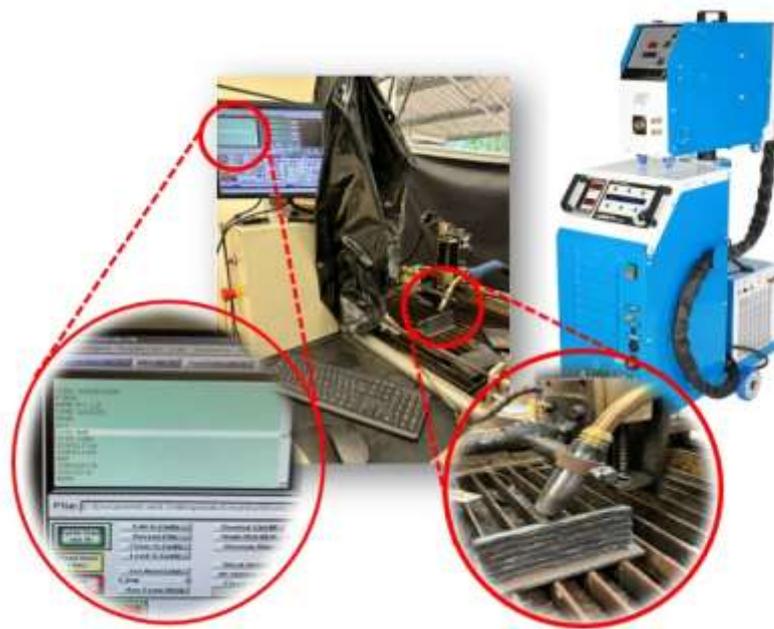
Fonte: Adaptado de NGUYEN et al (2023).

2.3. Equipamento de Manufatura Aditiva Através de Fusão Localizada

Para fabricação das peças, foi realizada a integração de uma máquina de soldagem a arco com uma máquina CNC (centro numérico computadorizado) para

coordenar a produção de peças impressas. Foi utilizada também, uma máquina de soldagem semiautomática modelo DigPLUS, da marca IMC, conforme mostrado na Figura 2, adaptada para permitir comandos programados. Esse mesmo procedimento foi aplicado aos processos MIG/MAG, sendo este último utilizado para a produção de peças destinadas aos ensaios com o processo MAG.

Figura 2: Máquina de manufatura aditiva



Fonte: Do autor.

A máquina de manufatura opera com comandos CNC, realizando movimentos em três eixos, incluindo o controle da tocha, que é responsável pela deposição uniforme do material camada por camada. Esse controle preciso é essencial para garantir que as peças fabricadas tenham dimensões bem definidas, eliminando a necessidade de retrabalho. A programação é realizada manualmente utilizando a linguagem G por meio do software Mach 3.

2.4. Ensaio de tração

Três paredes medindo cerca de 6 mm de largura, 120 mm de comprimento e 95 mm de altura foram fabricadas para análise das camadas

depositadas durante a impressão. Após a impressão, as peças foram cortadas em diferentes direções em relação ao substrato de deposição, formando chapas para obtenção de corpos de prova destinados a ensaios mecânicos de tração.

Essa etapa é crucial para validar a homogeneidade do material nas diferentes direções e avaliar tensões de trabalho, como tensão de escoamento, tensão máxima e alongamento, permitindo assim uma análise anisotrópica. O ensaio de tração para o aço carbono seguiu a norma NBR ISO 6892. Extraíu-se cinco amostras a 0°, 45° e 90° em relação ao substrato de deposição, conforme Figura 3.

Figura 3: Ilustração das posições dos corpos de provas



Fonte: Do autor.

2.5. Parâmetro de Fusão

Para obter as peças, foi estabelecido parâmetros ideais como tensão e corrente para derreter o consumível, vazão do gás para proteger a poça de fusão, velocidade de deposição para garantir boa penetração e o tipo de gás utilizado.

O gás de proteção utilizado é uma mistura composta por 75% de argônio (Ar) e 25% de dióxido de carbono (CO₂), que forma o gás de proteção para a soldagem MAG. Em termos de parâmetros, foram utilizados 18,9 V de tensão, corrente de 136 A, velocidade do arame de 5,08 m/min e vazão do gás de 13,4 l/min.

Posteriormente, foi determinada a velocidade de avanço da tocha, a qual é controlada por meio de programação. Através de testes preliminares as melhores camadas foram obtidas com velocidade de 300 mm/min.



2.6. Ensaio de Microdureza Vickers

Para verificar a homogeneidade da dureza na peça fabricada, foi realizado um ensaio de microdureza Vickers, utilizando um microdurômetro modelo HMV-2TADW da marca SHIMADZU®.

O estudo foi conduzido ao longo de um perfil, com 20 penetrações no sentido longitudinal perpendicular ao plano do substrato, aplicando uma força de 9,809 N e com uma distância de 1,0 mm entre cada penetração. Os resultados foram obtidos conforme (1).

$$HV = \frac{1,8544 F}{d^2} \quad (1)$$

Onde:

Hv: Hardness Vickers (HV);

F: Carga aplicada (Kg);

d²: Distância entre as diagonais (mm).

2.7. Análise Metalográfica

Foi realizada análise metalográfica conforme a ABNT NBR 15454 para aços carbono, usando um microscópio Olympus SC30, para identificar trincas, inclusões ou porosidades nos cordões depositados nas paredes ensaiadas.

3 MATERIAIS E MÉTODOS

A seguir, serão discutidos os resultados obtidos durante este estudo. O experimento visou realizar uma quantidade significativa de ensaios para obter resultados variados, permitindo assim uma conclusão abrangente do processo.

3.1. Obtenção dos corpos de provas para ensaio de tração

Após a impressão das peças utilizando um arame consumível ER70S-6 com auxílio da máquina de manufatura aditiva que foi ilustrada na Figura 2, foram

obtidas 3 paredes das quais foram extraídos cinco corpos de provas cada. Para cada parede foi utilizado uma posição de extração, sendo elas, 0°, 45° e 90°.

A Figura 4 demonstra o resultado final de uma parede antes da qualquer outro procedimento pós fabricação.

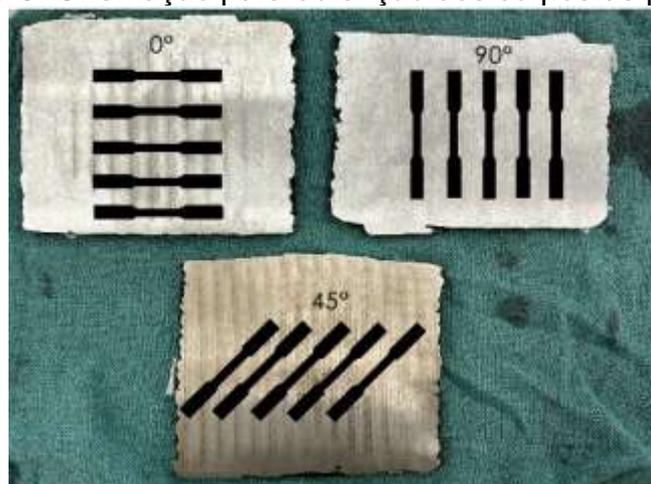
Figura 4: Parede obtida por manufatura aditiva.



Fonte: Do autor.

A orientação dos corpos de prova é apresentada na Figura 5, bem como as três paredes já usinadas, sendo que estes foram cortados com laser na extração dos corpos de provas conforme norma NBR ISO 6892.

Figura 5: Orientação para obtenção dos corpos de provas.



Fonte: Do autor.

A caracterização das paredes fabricadas por manufatura aditiva é representada na Tabela 2, sendo que 25% da largura média é retirado na usinagem, especificamente para se obter os corpos de provas.

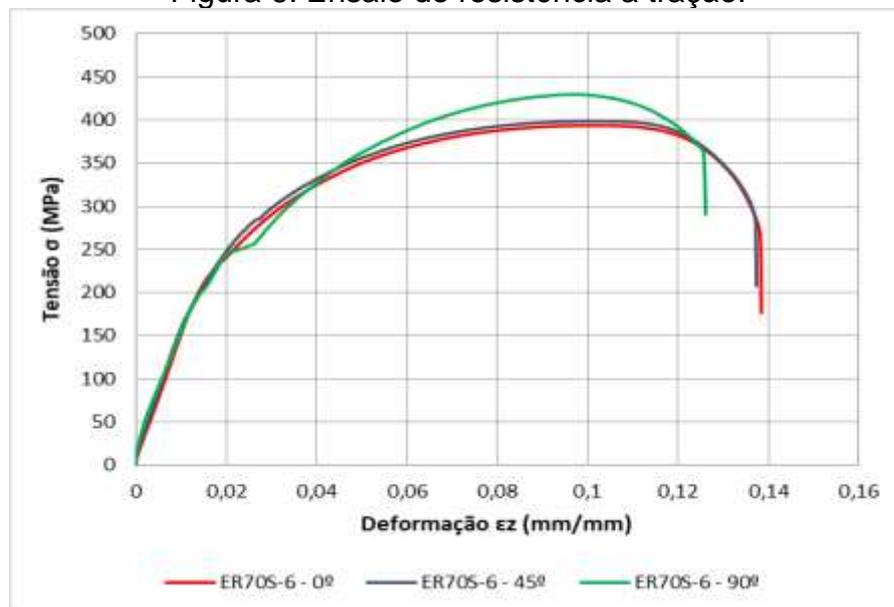
Tabela 1: Caracterização de parede ER70S-6.

Altura/camada (mm/camada)	Nº de camadas	Altura média (mm)	Largura média (mm)	Largura média efetiva (mm)
3,16	30	94,8	12	8

3.2 Ensaio de tração

Após ensaiados, os corpos de provas, apresentaram os resultados de resistência a tração exposto na Figura 6.

Figura 6: Ensaio de resistência a tração.



Fonte: Do autor.

O gráfico, representado na figura acima, de tensão-deformação do aço ER70S-6, ensaiado em três orientações diferentes (0°, 45° e 90°) em relação ao substrato, revela comportamento anisotrópico. A orientação de 90° apresenta a maior resistência à tração, atingindo cerca de 430 MPa, seguida pela de 45° com aproximadamente 400 MPa. A orientação de 0°, paralela ao substrato, mostra a menor resistência, cerca de 390 MPa, mas maior ductilidade, com deformação de até 0,14 mm/mm. Esse comportamento indica que a orientação da carga em relação à deposição tem influência nas propriedades mecânicas do material, sendo a resistência máxima maior nas direções perpendiculares e a ductilidade maior na direção paralela à deposição.

Na Tabela 3 é está demonstrado os resultados advindos dos ensaios de resistência a tração.

Tabela 2: Caracterização dos ensaios de resistência a tração.

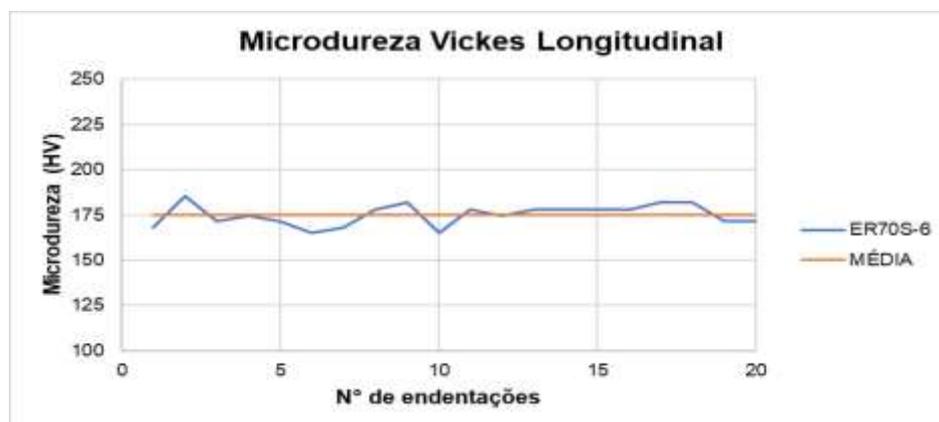
Posição ensaio [°]	Tensão máxima σ [MPa]	Tensão de escoamento σ [MPa]	Deformação ϵ_z [mm/mm]
0	393,35	254,31	0,1388
45	398,28	206,83	0,1303
90	429,28	209,88	0,1272

Ambos os dados da Tabela 3 e as curvas do gráfico da Figura 6 mostram que o aço ER70S-6 apresenta comportamento anisotrópico, com variações significativas nas propriedades de resistência e ductilidade dependendo da orientação do ensaio. A orientação de 90° oferece a maior resistência à tração, enquanto a de 0° permite maior deformação antes da ruptura, indicando que a escolha da orientação é crucial para aplicações que exigem otimização das propriedades mecânicas do material. A orientação de 45° apresenta um bom equilíbrio entre resistência e ductilidade, sugerindo que pode ser uma opção versátil para aplicações que requerem ambas as propriedades.

3.3 Ensaio de microdureza Vickers

A representação gráfica do ensaio de microdureza é apresentada no Figura 7.

Figura 7: Ensaio de microdureza Vickers.



Fonte: Do autor.



A tabela a seguir mostra os resultados da caracterização do ensaio de microdureza Vickers.

Tabela 3: Caracterização do ensaio de microdureza Vickers.

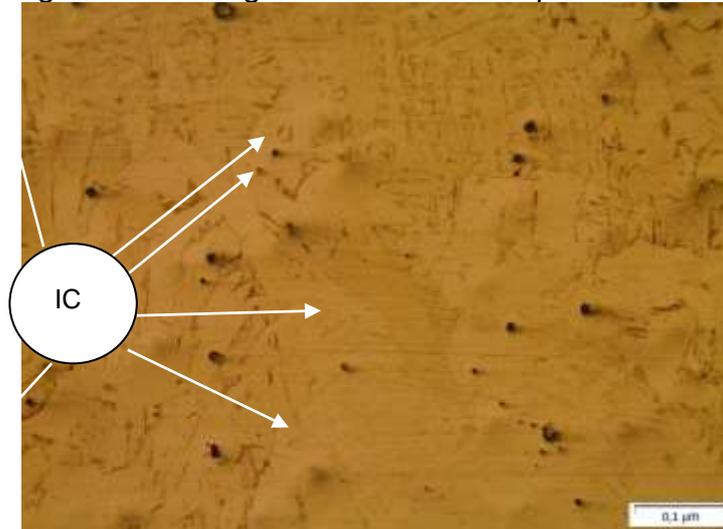
Material	Microdureza máxima [HV]	Microdureza mínima [HV]	Microdureza média [HV]
ER70S-6	185,38	164,99	175,05

Os resultados da Figura 7 e da Tabela 4 mostram que a dureza do material ER70S-6, medida em Vickers (HV), é relativamente estável, com pequenas variações em torno de 175 HV ao longo de 20 endentações. A microdureza máxima foi de 185,38 HV, a mínima de 164,99 HV e a média de 175,05 HV, indicando uma consistência nas propriedades de microdureza do material em diferentes pontos de medição.

3.4 Ensaio metalográfico

A Figura 8 representa a microestrutura do aço ER70S-6, revelando diversas características metalográficas importantes. As pequenas manchas escuras e irregulares, indicadas por setas, são provavelmente inclusões (IC) não metálicas ou porosidades presentes no material. Essas inclusões podem ser compostas por óxidos, sulfetos ou outras impurezas, mas também, devido a solidificação rápida impedindo que certos gases saiam antes de solidificar.

Figura 8: Metalografia do material depositado 200x.



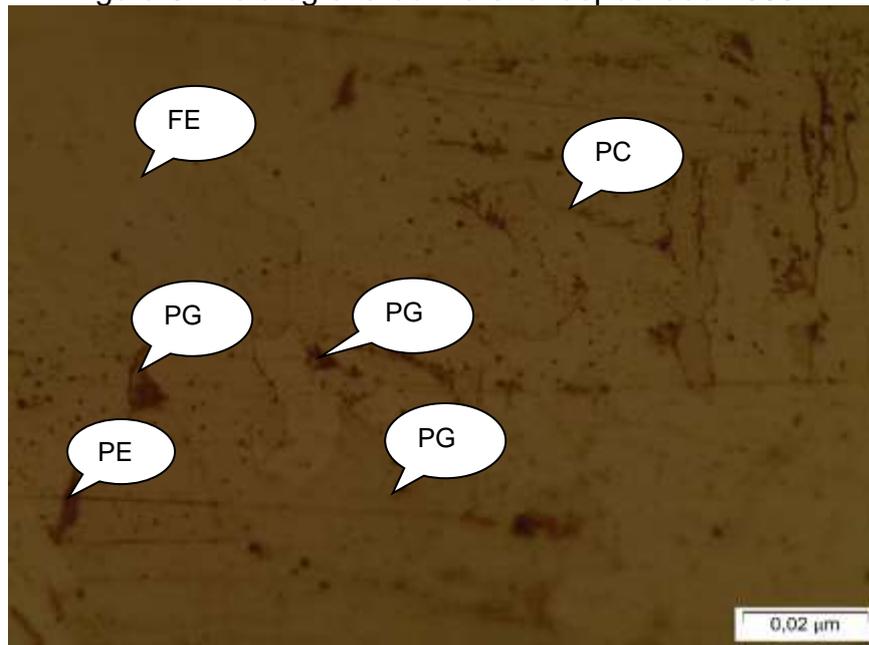
Fonte: Do autor.

A matriz mais clara predominante na microestrutura é composta por ferrita (FE), uma fase de ferro com baixa quantidade de carbono, que se apresenta como uma estrutura cúbica de corpo centrado (CCC). A ferrita é macia e dúctil, contribuindo para a maleabilidade do aço. Já as áreas mais escuras correspondem à perlita (PE), uma estrutura formada por camadas alternadas de ferrita e cementita (Fe_3C). A perlita confere ao material maior resistência e dureza em comparação com a ferrita pura, devido à presença de cementita, que é uma fase dura e quebradiça.

A análise metalográfica do aço ER70S-6 depositado, utilizou microscopia óptica com aumento de 200x, sendo possível identificar inclusões e fases do metal. As inclusões, visíveis em diferentes pontos, variam em tamanho e proximidade, podendo atuar como pontos de concentração de tensão e facilitar fraturas, afetando negativamente a resistência à tração e a ductilidade do material. A distribuição de ferrita e perlita sugere uma boa combinação de ductilidade e resistência, tornando o aço ER70S-6 adequado para aplicações de soldagem.

A Figura 9 mostra uma metalografia do aço ER70S-6 com aumento de 1000x, na qual foram identificadas várias fases e microconstituintes.

Figura 9: Metalografia do material depositado 1000x.



Fonte: Do autor.

A perlita de contorno de grão ferrítico (PC) é uma estrutura lamelar composta de ferrita e cementita, formada ao longo dos contornos dos grãos de ferrita. Essa perlita tem uma aparência de camadas alternadas e está identificada como "PC" na micrografia. A perlita poligonal (PG), por sua vez, apresenta uma morfologia mais arredondada ou em forma de grão, diferente das lamelas mais alongadas e paralelas, e está indicada pelas legendas "PG" na imagem.

A predominância de ferrita e perlita (PE) confirma que o material analisado é um aço de baixo carbono, típico para aplicações em que se busca um equilíbrio entre ductilidade, proporcionada pela ferrita, e resistência, fornecida pela perlita. A distribuição das fases e suas diferentes morfologias indicam que o material pode ter sido submetido a um processo de fabricação com condições de resfriamento específicas, nesse caso a soldagem, resultando na formação de diferentes tipos de perlita.

4 CONSIDERAÇÕES FINAIS

Este estudo demonstrou a viabilidade do uso da Manufatura Aditiva por Arco de Arame (WAAM) para a produção de peças em aço de baixo carbono, destacando a análise das características mecânicas, particularmente a anisotropia.



Utilizando o arame ER70S-6, foi possível fabricar peças com diferentes orientações de camada e avaliar suas propriedades mecânicas através de ensaios de tração e microdureza.

Os resultados dos ensaios de tração revelaram que a orientação das camadas influencia significativamente a resistência e ductilidade das peças. A orientação de 90° em relação ao substrato apresentou a maior resistência à tração, atingindo aproximadamente 429 MPa, enquanto a orientação de 0° demonstrou maior ductilidade, com um alongamento máximo de até 0,1388 mm/mm. Esses resultados confirmam a natureza anisotrópica do material, onde diferentes orientações apresentam propriedades mecânicas variadas.

Os ensaios de microdureza indicaram uma distribuição consistente de dureza ao longo das peças, com valores médios em torno de 175 HV. Essa uniformidade é essencial para garantir a qualidade das peças produzidas e sua adequação para diferentes aplicações industriais. A análise metalográfica corroborou esses achados, mostrando uma microestrutura composta principalmente de ferrita e perlita, com a presença de algumas inclusões e porosidades, comuns em processos de fabricação aditiva.

Em conclusão, a técnica WAAM é uma abordagem promissora para a fabricação de componentes metálicos complexos, especialmente quando são necessárias altas taxas de deposição de material e boa integridade estrutural. Para futuras aplicações, é essencial um controle rigoroso dos parâmetros de deposição para minimizar a anisotropia e otimizar as propriedades mecânicas das peças. Estudos adicionais focados na redução de inclusões e porosidades poderiam melhorar ainda mais a qualidade do material produzido.

REFERÊNCIAS

[1] JONES, D. **The Evolution of Additive Manufacturing: Historical Perspectives**. Journal of Manufacturing Science and Engineering, 2017.

[2] THOMAS, M.; WANG, S. **GMAW and MIG/MAG Processes in Additive Manufacturing**. Welding Journal, 2019, 291-297p.



[3] LEE, A.; SINGH, P. **Material Characteristics and Limitations in Wire Arc Additive Manufacturing**. Materials Science and Technology, 2020, 1045-1053p.

[4] CAMPATELLI, L.; SCIPPA, M.; MURA, G. A. **Parameter Optimization in Wire and Arc Additive Manufacturing**. International Journal of Advanced Manufacturing Technology, 2019, 299-318p.

[5] SMITH, J.; BROWN, R. **Wire and Arc Additive Manufacturing of Metals: Process Review**. Additive Manufacturing, 2018, 192-203p.

[6] SCH CAMPATELLI, L.; SCIPPA, M. **Surface Finish in Additive Manufacturing: Techniques and Improvements**. CIRP Annals, 2018, 487-510p.

[7] CASAGRANDE, H. C.; et al. **Carbon precipitation on the bonding line between deposited material and base material using an additive manufacturing process**. Seven Editora, [S.l.], p 733–746, 2024.

[8] NGUYEN, V.-T., MINH, P. S., UYEN, T. M. O., DO, T. T., NGOC, H. V. T., LE, M.-T., & NGUYEN, V. T. T. (Ano). **Técnica WAAM: Parâmetros de Processos que Afetam as Propriedades Mecânicas e Microestruturas do Aço de Baixo Carbono**. Metais, 13(5), 873p, 2023.