



AVALIAÇÃO DO PROCESSO DE MANUFATURA ADITIVA BASEADO NA TÉCNICA WAAM A PARTIR DO HL 85 MC-B

Rafael Saturno¹
Carlos Antônio Ferreira²
Anderson Daleffe³
Lirio Schaeffer⁴
Rodrigo Concer⁵

Resumo: Novas técnicas de manufatura buscam atender os desafios da indústria. Abordando temas de melhoria de processos de fabricação, o estudo desenvolvido visa avaliar o comportamento do processo de manufatura aditiva (MA) realizada pelo método WAAM (Wire Arc Additive Manufacturing) ou manufatura aditiva por soldagem a arco elétrico, a partir do arame tubular HL 85 MC-B, composto por elementos de liga como níquel, manganês, cromo e molibdênio. Através de análises químicas e mecânicas das amostras o experimento pretende verificar se a dureza, microestrutura e composição química dessas amostras, sofrerão alterações devido à diferentes velocidades de deposição aplicadas no processo. Para realização do processo de MA, foi utilizado a combinação de dois equipamentos, sendo eles, uma máquina de soldagem semiautomática e uma mesa CNC com graus de liberdade em X, Y e Z, ligada a um *software* que permitiu comunicação através de comandos numéricos. Nesse contexto, foram realizados MA de três amostras através do processo de soldagem MAG, onde os parâmetros de soldagens foram configurados com velocidades de deposição diferentes para as três amostras produzidas. A avaliação de dureza, microestrutura e composição química identificou variações satisfatórias nas amostras. Sendo assim, o processo apresenta uma alternativa para fabricação que permite obter geometrias complexas e com propriedades mecânicas que podem ter aplicações específicas para área metal mecânica.

Palavras-Chave: Manufatura aditiva. WAAM. Soldagem MAG. HL 85 MC-B. Níquel.

1 INTRODUÇÃO

O interesse nas tecnologias de manufatura aditiva vem ganhando destaque, por conta disto, as empresas dos setores aeronáutico, aeroespacial, e automotivo, estão investindo fortemente. Por exemplo a britânica Rolls-Royce em parceria com a Universidade de Cranfield, desenvolveu estudos na área de soldagem

¹ Bacharel em Engenharia Mecânica UniSATC. Email: rafastno@gmail.com

² Doutorando em Engenharia Metalúrgica UFGRS. Email: carlos.ferreira@satc.edu.br

³ Professor Dr. Centro Universitário UniSATC. Email: anderson.daleffe@satc.edu.br

⁴ Professor Dr. Universidade Federal do Rio Grande do Sul UFGRS. Email: 00002781@ufrgs.br

⁵ Mestrando em Engenharia Metalúrgica UniSATC. Email: rodrigoconcer@gmail.com



a arco elétrico sob proteção gasosa (GMAW), com o objetivo de utilizar a tecnologia de MA para fabricar componentes de aeronaves baseado em ligas de níquel e titânio, proporcionando a redução de desperdício de material (WANG; CHEN; KONOVALOV, 2017).

Neste contexto, esta pesquisa visa desenvolver estudo na área de manufatura aditiva baseado no método WAAM. Com o objetivo de avaliar o seu processo a partir do arame tubular HL 85 MC-B, investigando através de estudos químicos e mecânicos, as características da liga metálica em três velocidades de deposição.

2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

2.1 MANUFATURA ADITIVA

O processo tecnológico de manufatura aditiva para componentes metálicos, tem potencial para reduzir os custos de processo de usinagem em quase 50%, quando se trata de ligas de alta resistência. Um dos principais objetivos da tecnologia é a redução do tempo de produção e uso de material, enquanto os desafios mais impactantes enfrentados pela mesma, é a melhoria de desempenho e qualidade estrutural dos componentes (SINGH; KHANNA, 2021).

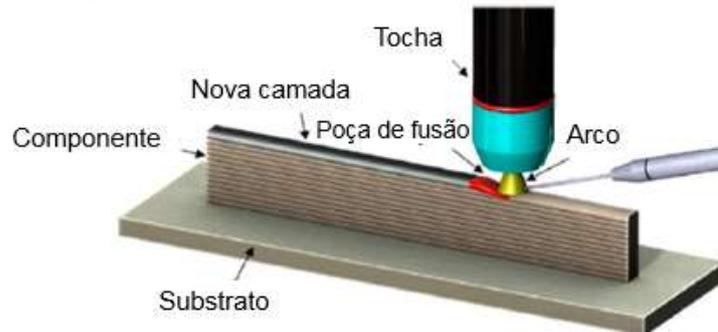
As tecnologias de MA para componentes metálicos são classificadas principalmente em fusão do leito de pó, deposição por energia direta, aspersão de aglutinante e manufatura de materiais laminados. Normalmente os materiais de adição utilizado nas técnicas são pó metálico e arame metálico (DING *et al.*, 2015).

2.1.1 Técnica WAAM

A técnica WAAM é classificada como MA na categoria de deposição por energia direta; e é definida pela utilização de um arco elétrico utilizado como fonte de calor, combinado a um arame que é empregado no processo como matéria prima. A representação esquemática do processo pode ser verificada na Fig. 1. WAAM se baseia nos conceitos fundamentais do processo de soldagem automatizado, tal como: GMAW (Gas Metal Arc Welding) ou soldagem a arco elétrico sob proteção gasosa,

PAW (Plasma Arc Welding) ou soldagem a arco com plasma, GTAW (Gas-Shielded Tungsten Arc Welding) ou soldagem a arco de tungstênio com proteção gasosa (GTAW) (RODRIGUES *et al.*, 2019).

Figura 1: Representação da técnica WAAM.



Fonte: Adaptado de Rodrigues *et al.* (2019)

2.2 PROCESSO DE SOLDAGEM MIG/MAG

O processo de soldagem MIG/MAG consiste na combinação de uma fonte de calor gerada a partir de um arco elétrico, com material de adição constituído de um arame metálico de determinada composição química. Neste processo a fonte de calor junto ao arame que é alimentado ao processo de forma automática, forma uma poça de fusão entre os materiais a serem soldados (PEREIRA, 2021).

2.2.1 Processo de soldagem GMAW

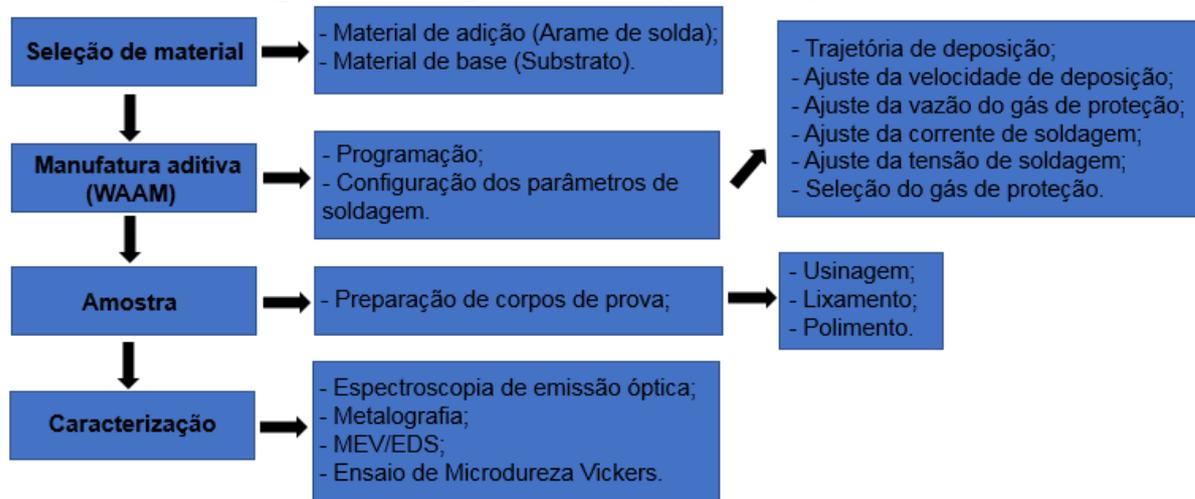
Dos processos existentes de soldagem a arco, GMAW é conhecido como o processo de metal de gás inerte (MIG) e metal de gás ativo (MAG), sendo o mais utilizado na técnica WAAM. Nesses processos é utilizado gás inerte ou ativo, que atua na proteção da poça de fusão. No processo MIG, o gás atua somente com uma atmosfera de proteção aos redores da poça de fusão, já no MAG, o gás além de atuar como atmosfera de proteção, também influencia na poça de fusão (RODRIGUES *et al.*, 2019).

3 PROCEDIMENTOS EXPERIMENTAIS

Os experimentos foram realizados no laboratório de soldagem e usinagem do Centro Universitário da SATC (UNISATC). Para o desenvolvimento da pesquisa o laboratório forneceu os insumos e ferramentas utilizados no processo.

Para entendimento da metodologia, na Fig. 3 pode ser verificado o fluxograma das etapas do experimento para melhor compreensão da pesquisa experimental.

Figura 3: Fluxograma das etapas do experimento.



Fonte: Do autor (2022)

3.1 LIGA METÁLICA

Para a realização da manufatura aditiva o material de adição utilizado foi o arame tubular AWS A5.28 de 1,2 mm de diâmetro, desenvolvido para soldagem de passe único ou multipasse, utilizando como gás de proteção uma mistura de Ar + CO₂. Dentre as principais características do material destaca-se: elevada resistência, boa soldabilidade, excelente aparência do cordão, isenção de respingos e escórias no processo, favoráveis propriedades mecânicas a baixas temperaturas (-51 °C) antes e após tratamento térmico (BÖHLERWELDING BY VOESTALPINE, 2015). Na Tab. 1 verifica-se a composição química da liga que será processada, e na Tab. 2 os parâmetros de soldagem estabelecidos pelo fabricante do consumível.



Tabela 1: Composição química do material de adição

Elementos químicos	%Peso
C	0,07
Si	0,40
Mn	1,40
P	<0,025
S	<0,025
Cr	0,50
Ni	2,20
Mo	0,40

Fonte: Böhlerwelding by Voestalpine (2015)

Conforme a Tab. 1, o material de adição é composto principalmente de elementos de liga como manganês (Mn), cromo (Cr), níquel (Ni) e molibdênio (Mo).

Tabela 2: Dados operacionais do fabricante

Variáveis	Valores
Tensão (V)	12 – 35
Corrente (A)	50 – 320
Diâmetro do consumível (mm)	1,2
Vazão de gás (L/min)	14 – 20
Gás (%)	75% Ar + 25% CO ₂

Fonte: Böhlerwelding by Voestalpine (2015)

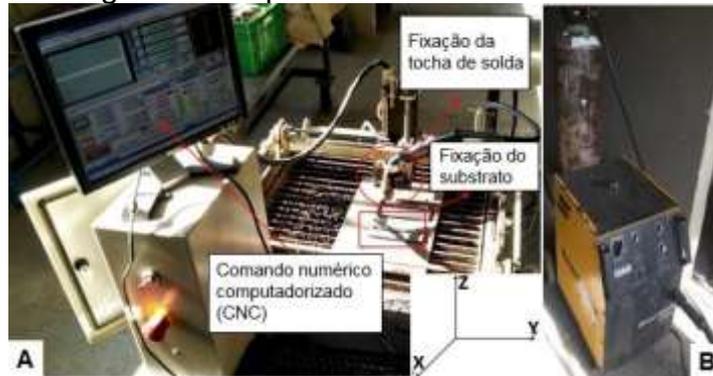
Para o início da manufatura aditiva foi selecionado como material de base (substrato) o aço AISI 1020, por ser um aço comum e de baixo custo.

3.2 PROCESSO DE MANUFATURA ADITIVA (WAAM)

O processo foi realizado em uma máquina fabricada na UNISATC. Essa máquina é constituída de um eixo acoplado em uma mesa, com graus de liberdade em X, Y e Z; combinado a uma tocha de máquina de solda, verificado na Fig. 4A. Para que o equipamento trabalhe de forma automatizada, foi adaptado um sistema de comando numérico. Desta forma é possível ter o controle linear de altura da tocha, proporcionando homogeneidade na realização da deposição do material.

A máquina de solda utilizada no processo foi o modelo SMASHWELD 250E semiautomática, da fabricante ESAB, conforme Fig. 4B. A máquina realiza técnica de soldagem MIG/MAG; e para este estudo, utilizamos o processo de soldagem MAG.

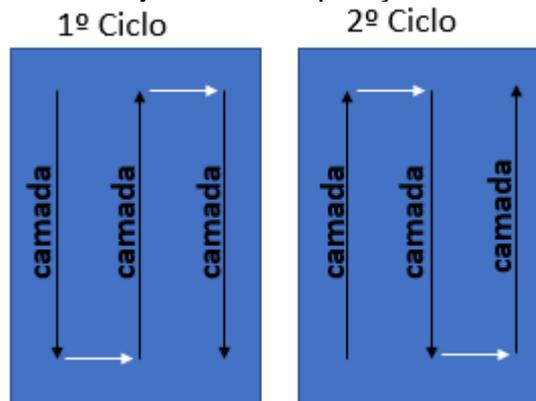
Figura 4: Máquina de manufatura aditiva.



Fonte: Do autor (2022)

A programação da manufatura foi realizada manualmente em código G, e foi utilizado o software Mach3 para o comando numérico computadorizado. A programação foi executada de forma que a manufatura acontecesse a cada dois ciclos de deposição, de tal forma que a cada dois ciclos era realizado o zeramento do CNC para uma nova deposição até completar as deposições planejadas. Parametrizou-se altura entre ponto de soldagem e tocha em 10 mm para cada percurso de deposição, e trajetórias contrárias entre ciclos em sequência de zig-zag conforme Fig. 5.

Figura 5: Trajetória de deposição do material.



Fonte: Do autor (2022)

Foram impressas três amostras, com dez deposições na vertical e três na horizontal, mantendo os parâmetros de soldagem iguais para os três processos, com exceção da velocidade de deposição, que foi propositalmente alterada de uma amostra para outra. O gás utilizado no processo com vazão de 14 L/min, foi a mistura de 75% de Argônio e 25% de CO₂. Na Tab. 3, verifica-se os parâmetros de soldagem atribuídos ao processo.



Tabela 3: Configuração dos parâmetros de soldagem.

Variáveis	AM1	AM2	AM3
Velocidade (mm/min)	300	400	500
Tensão (V)	20	20	20
Corrente (A)	200	200	200
Vazão de gás (L/min)	14	14	14

Fonte: Do autor (2022)

3.3 CARACTERIZAÇÃO DAS AMOSTRAS

As amostras foram devidamente preparadas para a caracterização e realização das análises objetivadas. Os ensaios se basearam nas normas da ASTM (American Society for Testing and Materials) verificada em cada ensaio.

3.3.1 Espectroscopia de emissão óptica

Para verificação da composição química quantitativa das amostras foi realizada a análise de espectroscopia de emissão óptica em cada uma delas através do equipamento de modelo Q2 ION, da fabricante BRUKER. Desta forma foi possível fazer uma comparação com a composição química do metal de solda utilizado no processo, como também, verificar a variação da composição química entre as amostras devido à variação de velocidade no processo.

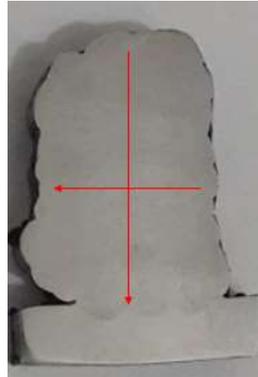
A execução das análises foi baseada na norma ASTM A751 – 11, a qual trata dos padrões e métodos para testes, práticas e terminologias para a análise química em produtos de aço.

3.3.2 Ensaio de microdureza Vickers

Para verificação da dureza ao longo das deposições, tanto no sentido transversal quanto no longitudinal de deposição, foi realizado o ensaio de microdureza Vickers. Sendo assim, foi construído perfil de dureza com quinze indentações no sentido vertical equidistantes em 1 mm, e 10 indentações no sentido horizontal também equidistantes em 1 mm, conforme Fig 6. Para a realização da técnica foi

utilizado equipamento de modelo HMV-2TADW, da fabricante Shimadzu, e será baseado na norma ASTM E384-17.

Figura 6: Sentido das indentações.



Fonte: Do autor (2022)

A dureza foi estabelecida por meio da Eq. 1, utilizando força de 0,5 kgf na indentação, por um tempo de 10 segundos, sendo que as medidas das diagonais da impressão foram verificadas por meio de microscópio.

3.3.3 Metalografia

Para análise da microestrutura das amostras manufaturadas, fez-se necessário realizar ensaio de metalografia qualitativo, a fim de investigar as fases presentes na microestrutura, e entender se houve mudança de fases por conta da variação de velocidades no processo. Para a análise metalográfica foi utilizado o equipamento de modelo SC30, da fabricante OLYMPUS, baseado nas normas ASTM E407-07(2015)e1. Para preparação dos corpos de prova, a norma a ser seguida é ASTM E3-11(2017).

3.3.4 Mev/Eds

Foi realizado análise de MEV/EDS para verificação de inclusões originadas do processo, como também a composição química pontual através do EDS, para entender quais elementos estão presentes nessas inclusões.

O aço não pode ser totalmente livre de inclusões, devido ao processo de desoxidação do aço, ou ainda, de partículas que se precipitam durante o resfriamento

e solidificação ao longo do processo. Portanto as micro-inclusões podem ser toleradas, pois não necessariamente elas têm efeito nocivo às propriedades do material, de tal forma que até mesmo podem trazer benefícios, como restringir o tamanho de grão, aumentar o limite de escoamento e dureza, e também agir com núcleos para precipitação de carbeto e nitreto (MORAES, 2009).

4 RESULTADOS E DISCUSSÕES

Na sequência serão tratados os resultados obtidos ao longo dos experimentos e análises. Por se tratar de uma técnica nova de manufatura, diferentes condições foram estabelecidas, como a variação de velocidade de deposição no processo, a fim de verificar se há mudanças no comportamento das propriedades químicas e mecânicas da liga depositada, conforme os estudos realizados.

4.1 OBTENÇÃO DAS AMOSTRAS

Na Fig. 7, observa-se as amostras produzidas, sendo que a AM1 foi manufaturada com deposição de 300 mm/min, AM2 com 400 mm/min e AM3 com 500 mm/min.

Figura 7: Amostras impressas.



Fonte: Do autor (2022)

Na Tab. 4, são apresentados os dados dimensionais das deposições.



Tabela 4: Dados dimensionais das deposições.

Amostra	Altura cordão (mm)	Largura cordão (mm)	Distância cordão entre centros horizontal (mm)	Altura final deposição (mm)	Largura final deposição (mm)	Comprimento final deposição (mm)
AM1	1,80	2,20	6,00	18,00	22,00	150,00
AM2	2,00	2,00	5,00	20,00	20,00	150,00
AM3	2,20	1,80	4,00	18,00	18,00	150,00

Fonte: Do autor (2022)

Através da análise das deposições, percebeu-se que para velocidades menores (AM1), obteve-se maiores larguras de cordão e menores alturas de cordão. Para maiores velocidades (AM3), obteve-se maiores alturas de cordão e menores larguras de cordão. Dentro do range de análise, para velocidade mediana (AM2), obteve-se melhor relação altura x largura.

4.2 COMPOSIÇÃO QUÍMICA DAS AMOSTRAS

Na Tab. 5, verifica-se o resultado da composição química das amostras.

Tabela 5: Dados de Composição química.

Elemento %	AM1	AM2	AM3
C	0,07	0,08	0,07
Si	0,42	0,51	0,50
Mn	1,57	1,89	1,83
P	0,01	0,01	0,01
S	0,01	0,01	0,01
Cr	0,41	0,44	0,44
Mo	0,34	0,43	0,38
Ni	1,49	1,77	1,64
Cu	0,02	0,02	0,02
Al	0,02	0,02	0,02
Co	0,01	0,00	0,01
Nb	<0,0050	<0,0050	<0,0050
Ti	0,03	0,04	0,04
V	0,02	0,02	0,02
W	0,03	0,03	0,03
B	0,01	0,00	0,00
Sn	0,01	0,01	0,01
Fe	95,56	94,72	94,96

Fonte: Do autor (2022)



Referente a Tab. 1, verificou-se que houve variação na composição de alguns elementos de liga, como o manganês, níquel, cromo e molibdênio, fazendo uma comparação com os dados de composição química do arame utilizado no processo.

Esta variação na composição química pode estar relacionada com a diluição do material de base (substrato) com o material de adição (aramé), uma vez que no processo uma parcela do material de base entra na composição do metal de solda (FELIZARDO, 2016). Na Tab. 6, apresenta-se a composição química do aço SAE 1020.

Tabela 6: Dados de composição química SAE 1020.

Elemento %	Valores
C	0,18 - 0,23
Si	0,30 - 0,60
Mn	0,30 - 0,60
S	0,05 máx.
P	0,03 máx.

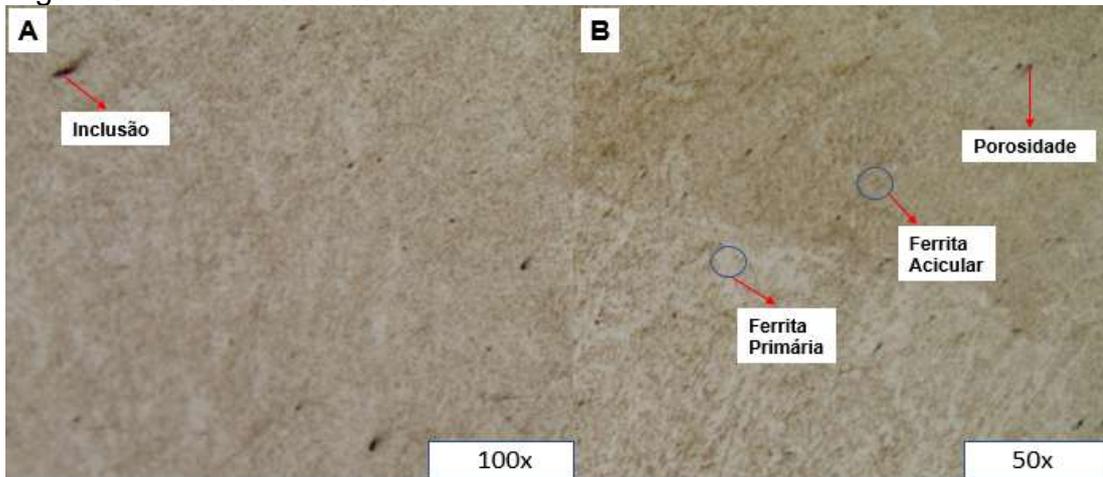
Fonte: Fundicar (2020).

Uma vez que na composição química do SAE 1020 há a presença de silício (Si) e manganês (Mn); esses elementos diluíram na composição do material de adição, como também, o níquel (Ni) diluiu no material de base; originando variações na composição química das amostras. Para a deposição em velocidade mais baixa referente a AM1, observou-se que o níquel diluiu mais do que nas outras velocidades, desta forma, velocidades mais baixas podem não ser propícias, pois há a possibilidade de maior taxa de diluição no processo.

4.3 ENSAIO METALOGRAFICO

Nas Fig. 8, 9 e 10, verificam-se as imagens obtidas no ensaio metalográfico.

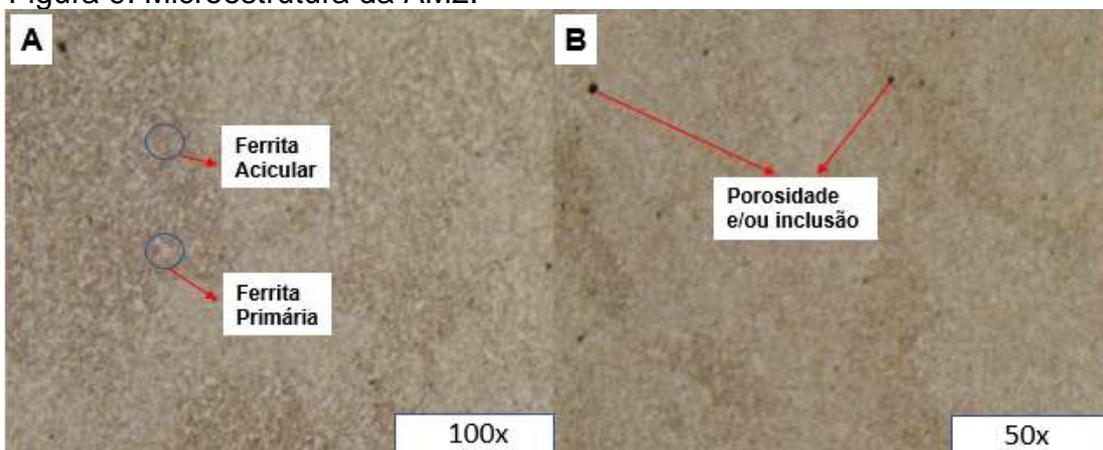
Figura 8: Microestrutura da AM1



Fonte: Do autor (2022)

Na microestrutura da AM1 da Fig. 8, sendo Fig. 8A aproximação de 100 vezes e Fig. 8B aproximação de 50 vezes; há formação de ferrita primária e ferrita acicular, que com relação ao metal de solda são os principais microconstituintes, de acordo com a nomenclatura utilizada internacionalmente proposta pelo IIW (International Institute of Welding). A ferrita primária decorrente de menores taxas de resfriamento, possui características de baixa dureza; já a ferrita acicular decorrente de maiores taxas de resfriamento, apresenta características de elevada resistência mecânica associada a tenacidade (MASTELARO, 2018). Observa-se também a formação de poros e inclusões em algumas regiões da microestrutura.

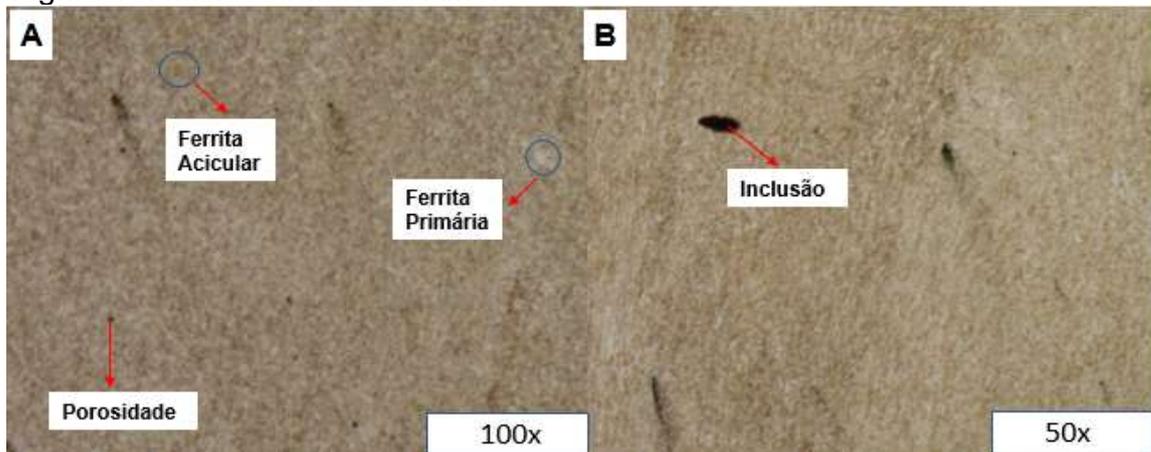
Figura 9: Microestrutura da AM2.



Fonte: Do autor (2022)

Na microestrutura da AM2, identifica-se formação de ferrita primária e ferrita acicular conforme Fig. 9, sendo Fig. 9A aproximação de 100 vezes e Fig. 9B aproximação de 50 vezes. Como também, nota-se formação de poros e inclusões.

Figura 10: Microestrutura da AM3.



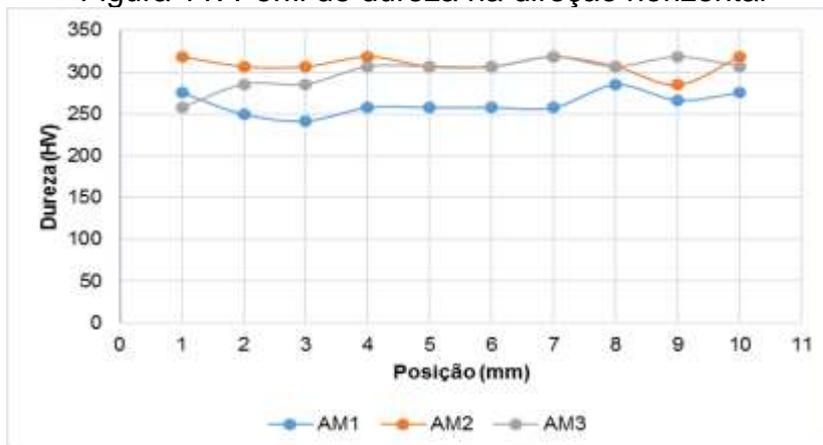
Fonte: Do autor (2022)

Já na microestrutura da AM3, visto na Fig. 10, sendo Fig. 10A aproximação de 100 vezes e Fig. 10B aproximação de 50 vezes; identifica-se formação de ferrita primária e ferrita acicular, semelhante a AM2. Como também a presença de poros e inclusões na microestrutura.

4.4 ENSAIO DE MICRODUREZA VICKERS

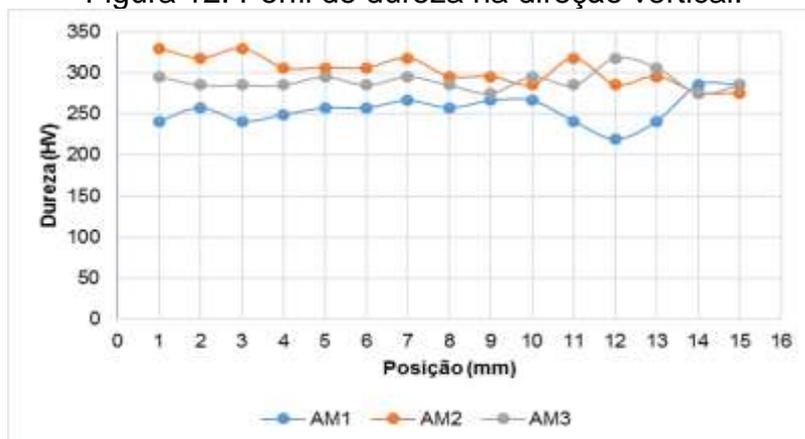
Nas Fig. 11 e 12, verifica-se o perfil de dureza obtido através do ensaio de microdureza Vickers. Foram realizados nas amostras perfis no sentido horizontal e vertical de deposição, conforme Fig. 6.

Figura 11: Perfil de dureza na direção horizontal



Fonte: Do autor (2022)

Figura 12: Perfil de dureza na direção vertical.



Fonte: Do autor (2022)

Na Tab. 7, verifica-se os valores médios do perfil de dureza da direção horizontal e vertical, com relação às amostras.

Tabela 7: Valores médios de dureza

Amostra	Direção Vertical (HV)	Direção Horizontal (HV)	Desvio Médio Direção Vertical	Desvio Médio Direção Horizontal
AM1	256	262	13	11
AM2	298	309	15	7
AM3	290	300	9	14

Fonte: Do autor (2022)

Os valores de dureza entre AM2 e AM3 são semelhantes, partindo do fato de que suas microestruturas tiveram uma formação mais homogênea de ferrita acicular ao longo da microestrutura. Já os valores de dureza da AM1 foram mais

baixos, pelo fato de que houve maior formação de ferrita primária ao longo da microestrutura, conforme Fig.8, fazendo com que o material obtivesse menor dureza.

4.5 ANÁLISE DE MEV/EDS

Na Fig. 13 observa-se imagem obtida através do MEV referente a microestrutura da AM1.

Figura 13: Imagem aproximada em 300x.



Fonte: Do autor (2022)

Na Tab. 8, verifica-se a composição química realizada no ponto indicado na Fig. 13, através do EDS.

Tabela 8: Composição química pontual.

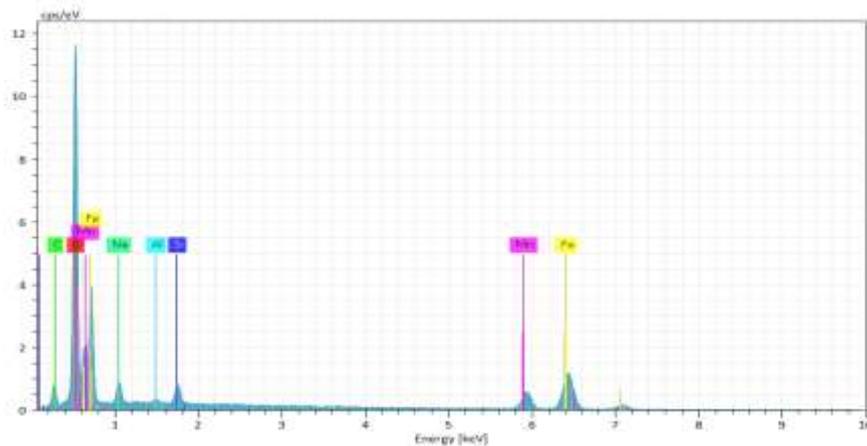
Elemento %	Valores
Ferro	40,47
Oxigênio	34,58
Manganês	15,91
Carbono	4,55
Sódio	2,40
Silício	1,77
Alumínio	0,32

Fonte: Do autor (2022)

Conforme composição química verificada na Tab. 8, a inclusão verificada na Fig. 13, possivelmente se dá pela formação de óxido de manganês, apresentando também a presença de sódio, que pode ser um contaminante originado de uma oxidação pontual do substrato.

Na Fig. 14, observa-se o espectro da composição química realizada no ponto indicado da Fig. 13, identificando o pico energético de cada elemento presente no ponto de análise.

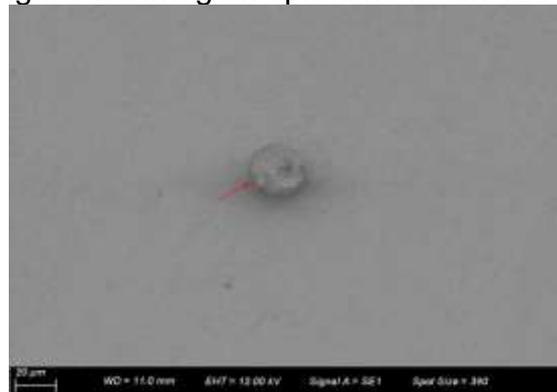
Figura 14: Espectros da composição química.



Fonte: Do autor (2022)

Na Fig. 15, observa-se imagem obtida da microestrutura por MEV referente a AM2.

Figura 15: Imagem aproximada em 1000x.



Fonte: Do autor (2022)

Na Tab. 9, verifica-se a composição química realizada no ponto indicado da Fig. 15, através do EDS.

Tabela 9: Composição química pontual.

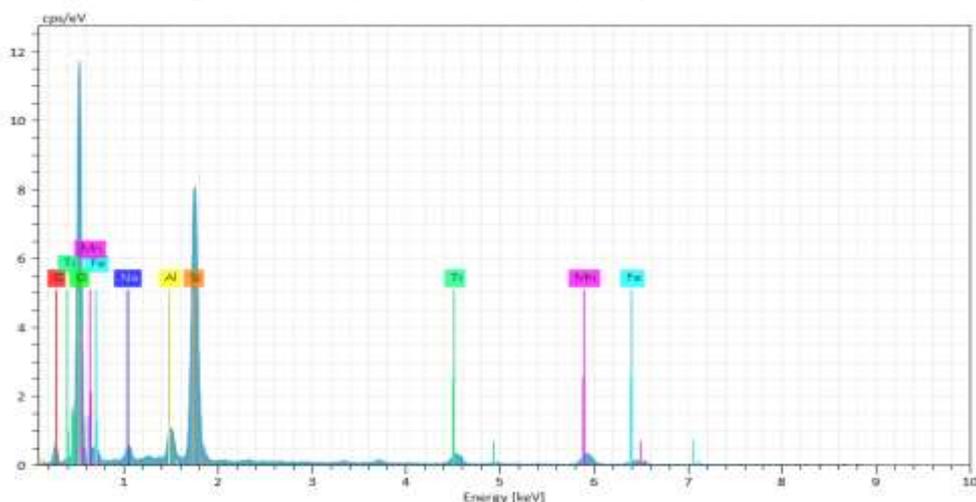
Elemento %	Valores
Oxigênio	50,25
Silício	23,04
Manganês	10,55
Carbono	6,09
Ferro	3,59
Titânio	3,54
Sódio	0,99
Alumínio	1,94

Fonte: Do autor (2022)

De acordo com a composição química pontual realizada na inclusão apresentada na Fig. 15, há a presença em grandes proporções dos elementos oxigênio e silício, formando óxido de silício decorrente da desoxidação que acontece na poça de fusão. Há a presença de sódio, que possivelmente originou de uma oxidação pontual do substrato. A presença de titânio pode ser decorrente da composição química do metal de solda ou do substrato.

Na Fig. 16, observa-se o espectro da composição química realizada no ponto indicado da Fig. 15, identificando o pico energético de cada elemento presente no ponto de análise.

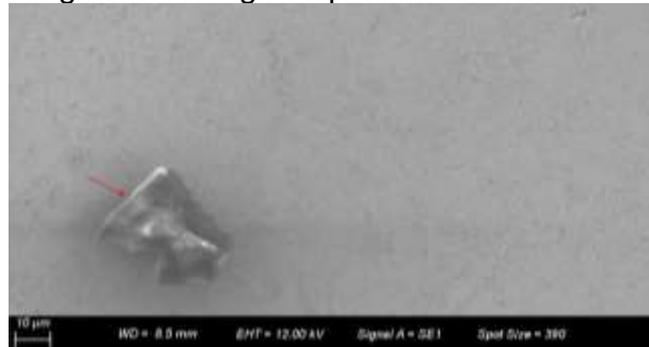
Figura 16: Espectros da composição química.



Fonte: Do autor (2022)

Na Fig. 17, observa-se imagem obtida através do MEV referente a microestrutura da AM3.

Figura 17: Imagem aproximada em 1500x.



Fonte: Do autor (2022)

Na Tab. 10, verifica-se a composição química realizada no ponto indicado da Fig. 17, através do EDS.

Tabela 10: Composição química pontual.

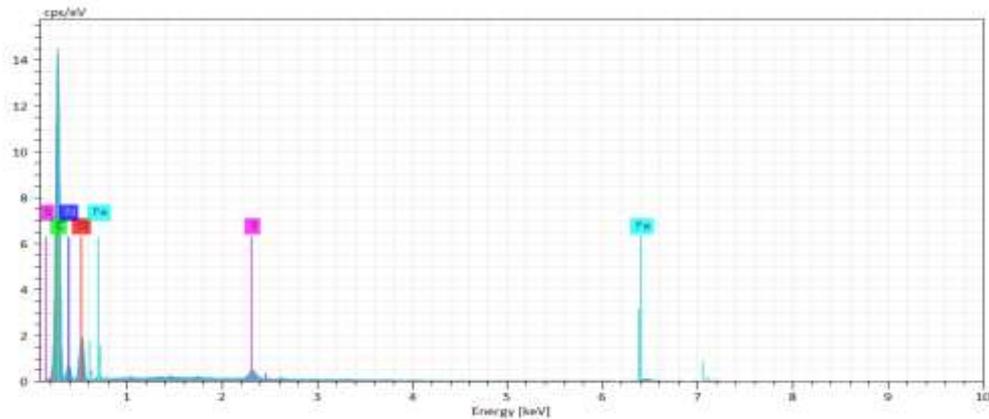
Elemento	Valores %
Oxigênio	20,24
Carbono	60,14
Ferro	3,56
Nitrogênio	14,86
Enxofre	1,2

Fonte: Do autor (2022)

Conforme composição química verificada na Tab. 10, a inclusão verificada na Fig. 17, possivelmente originou-se do gás de proteção que possui em sua composição CO_2 . A presença de nitrogênio na inclusão, pode ser por conta da influência do ar atmosférico na poça de fusão. Há também a presença de enxofre que combinado ao ferro, pode ter formado sulfeto de ferro.

Na Fig. 18, observa-se o espectro da composição química realizada no ponto indicado da Fig. 17, identificando o pico energético de cada elemento presente no ponto de análise.

Figura 18: Espectros da composição química.



Fonte: Do autor (2022)

5 CONCLUSÕES

Após os experimentos e tratativas dos resultados, conclui-se que o método de fabricação entregou resultados positivos, pelo fato de apresentar homogeneidade no processo mediante as análises realizadas; de modo que não se obteve diferenças significativas nos resultados com a variação da velocidade de deposição, sendo um fator importante do ponto de vista do processo de fabricação.

O estudo se tornou relevante, já que a liga metálica estudada apresentou elementos de liga como manganês, níquel, cromo e molibdênio. A combinação desses elementos pode resultar em características essenciais como resistência à fadiga, resistência ao desgaste e resistência mecânica, e desta forma vir a ser utilizada para produção de peças voltadas para aplicações de engenharia.

A temperatura resultante do processo, é uma variável que tem influência na qualidade final da manufatura, pois a variação do ciclo térmico pode afetar as propriedades mecânicas finais. Desta forma, desenvolver controle desta variável se torna essencial para o processo

Diante dos resultados obtidos, a tecnologia estudada torna-se promissora, possibilitando a fabricação de peças metálicas contendo geometrias mais complexas. Contudo, o aspecto bruto da peça fabricada exige um processo de usinagem que ainda é indispensável para se obter a geometria e um acabamento mais adequado.



REFERÊNCIAS

BÖHLERWELDING BY VOESTALPINE. BÖHLER HL 85 MC-B Arame tubular metalcored, aço baixa-liga, alta resistência. 2015. Disponível em: www.voestalpine.com/welding. Acesso em: 22 mar. 2022.

DING, Donghong et al. Wire-feed additive manufacturing of metal components: technologies, developments and future interests. *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, v. 81, n. 1, p. 465-481, 2015. Disponível em: <https://link.springer.com/article/10.1007/s00170-015-7077-3>. Acesso em: 22 fev. 2022.

FELIZARDO, Ivanilza. Minas Gerais. Centro Federal de Educação Tecnológica de Minas Gerais. APOSTILA: TECNOLOGIA DA SOLDAGEM. 2016. Disponível em: <https://www.dem.cefetmg.br/wp-content/uploads/sites/39/2017/09/Apostila-Tecnologia-da-Soldagem.pdf>. Acesso em: 09 jun. 2022.

FUNDICAR (Santa Catarina). Normas de Ligas Fundidas. 2020. Disponível em: <https://fundicar.com.br/wp-content/uploads/2020/10/catalogo-fundicar.pdf>. Acesso em: 08 jun. 2022.

MASTELARO, Valmor Roberto. Congresso Brasileiro de Engenharia e Ciência dos Materiais-CBECiMat, 23. 2018. Disponível em: <https://www.ipen.br/biblioteca/cd/cbecimat/2000/Docs/TC301-082.pdf>. Acesso em 02 jun. 2022

MORAES, Luís Augusto Batista de. CARACTERIZAÇÃO DE MACRO E MICRO-INCLUSÕES EM AÇOS ACALMADOS AO ALUMÍNIO PRODUZIDOS POR LINGOTAMENTO CONTÍNUO. 2009. 180 f. Dissertação (Mestrado) - Curso de Engenharia, Engenharia Metalúrgica e de Materiais, Escola Politécnica da Universidade de São Paulo, São Paulo, 2009. Disponível em: https://www.teses.usp.br/teses/disponiveis/3/3133/tde-18112009-102050/publico/Luis_Moraes.pdf. Acesso em: 02 jun. 2022.

PEREIRA, Vinícius Silva. ANÁLISE DO PROCESSO DE SOLDAGEM MIG/MAG MANUALMENTE E AUTOMATIZADA. 2021. Disponível em: <http://192.100.247.84/bitstream/prefix/2237/1/TCC%20VINICIUS%20SILVA%20PEREIRA%20%281%29.pdf>. Acesso em: 14 abr. 2022.

RODRIGUES, Tiago A. et al. Current status and perspectives on wire and arc additive manufacturing (WAAM). *Materials*, v. 12, n. 7, p. 1121, 2019. Disponível em: <https://www.mdpi.com/1996-1944/12/7/1121>. Acesso em: 8 abr. 2022.

SINGH, Sudhanshu Ranjan; KHANNA, Pradeep. Wire arc additive manufacturing (WAAM): A new process to shape engineering materials. *Materials Today: Proceedings*, v. 44, p. 118-128, 2021. Disponível em:



<https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S2214785320358922>. Acesso em: 8 abr. 2022.

WANG, Yanhu; CHEN, Xizhang; KONOVALOV, S. V. Additive manufacturing based on welding arc: a low-cost method. *Journal of Surface Investigation: X-Ray, Synchrotron and Neutron Techniques*, v. 11, n. 6, p. 1317-1328, 2017. Disponível em: <https://link.springer.com/article/10.1134/S1027451017060210>. Acesso em: 22 jan. 2022.

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 a Pesquisa e Inovação do Estado de Santa Catarina – FAPESC pelo apoio financeiro na compra de equipamentos e insumos para pesquisa.



fapesc

Fundação de Amparo à
Pesquisa e Inovação do
Estado de Santa Catarina