

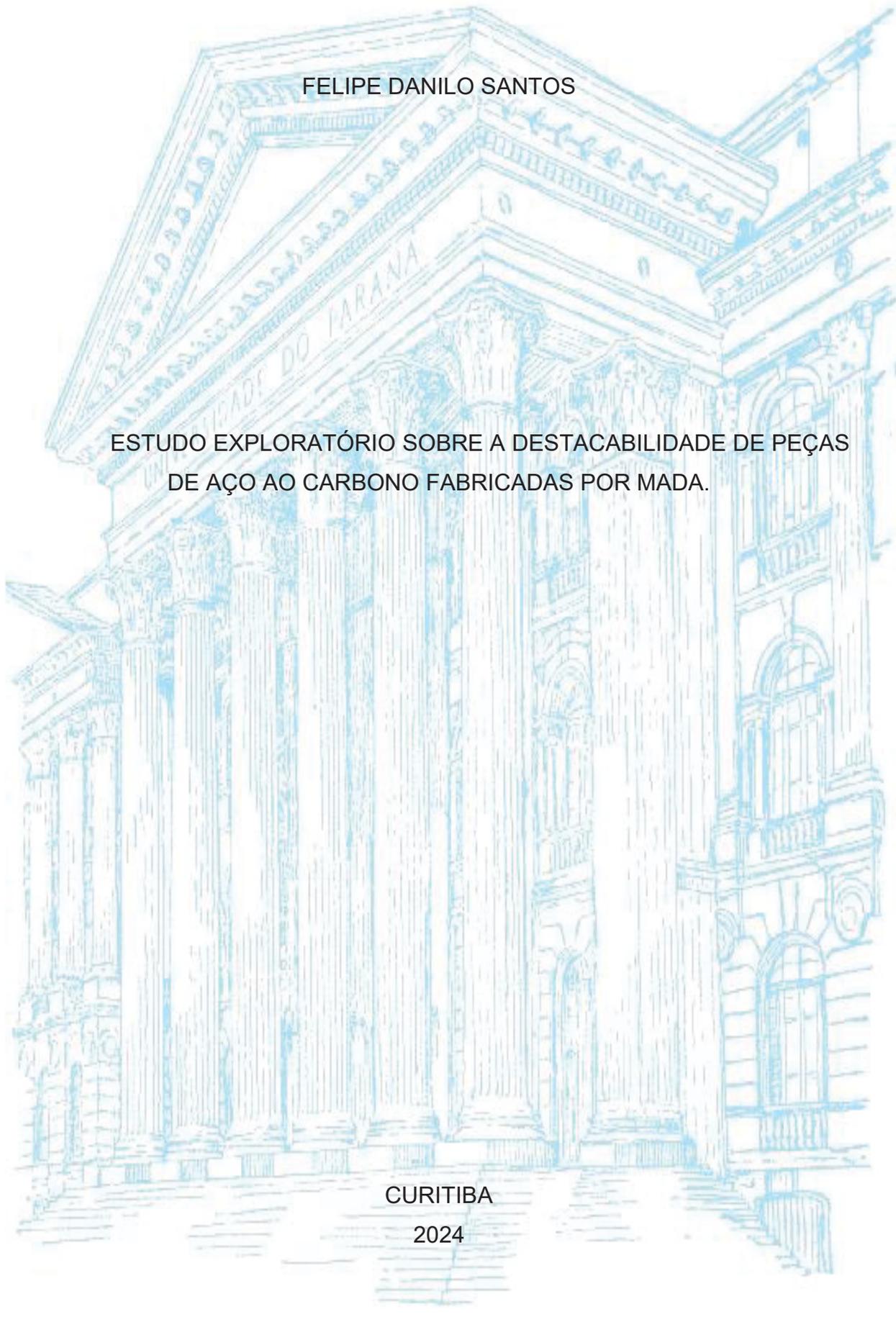
UNIVERSIDADE FEDERAL DO PARANÁ

FELIPE DANILO SANTOS

ESTUDO EXPLORATÓRIO SOBRE A DESTACABILIDADE DE PEÇAS
DE AÇO AO CARBONO FABRICADAS POR MADA.

CURITIBA

2024



FELIPE DANILO SANTOS

ESTUDO EXPLORATÓRIO SOBRE A DESTACABILIDADE DE PEÇAS DE
AÇO AO CARBONO FABRICADAS POR MADA.

Dissertação apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia de Manufatura do Setor de tecnologia da Universidade Federal do Paraná como requisito para obtenção do título de Mestre em Engenheiro de Manufatura.

Orientador: Prof. Dr. Paulo Cesar Okimoto.

CURITIBA

2024

DADOS INTERNACIONAIS DE CATALOGAÇÃO NA PUBLICAÇÃO (CIP)
UNIVERSIDADE FEDERAL DO PARANÁ
SISTEMA DE BIBLIOTECAS – BIBLIOTECA DE CIÊNCIA E TECNOLOGIA

Santos, Felipe Danilo

Estudo exploratório sobre a destacabilidade de peças de aço ao carbono fabricadas por MADA / Felipe Danilo Santos. – Curitiba, 2024.

1 recurso on-line : PDF.

Dissertação (Mestrado) - Universidade Federal do Paraná, Setor de Tecnologia, Programa de Pós-Graduação em Engenharia de Manufatura.

Orientador: Paulo Cesar Okimoto

1. Revestimentos – Processos. 2. Soldagem. 3. Aspersão térmica. 4. Manufatura Aditiva por Deposição a Arco (MADA). I. Universidade Federal do Paraná. II. Programa de Pós-Graduação em Engenharia de Manufatura. III. Okimoto, Paulo Cesar. IV. Título.

Bibliotecário: Elias Barbosa da Silva CRB-9/1894



MINISTÉRIO DA EDUCAÇÃO
SETOR DE TECNOLOGIA
UNIVERSIDADE FEDERAL DO PARANÁ
PRÓ-REITORIA DE PESQUISA E PÓS-GRADUAÇÃO
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO ENGENHARIA DE
MANUFATURA - 40001016171P2

TERMO DE APROVAÇÃO

Os membros da Banca Examinadora designada pelo Colegiado do Programa de Pós-Graduação ENGENHARIA DE MANUFATURA da Universidade Federal do Paraná foram convocados para realizar a arguição da Dissertação de Mestrado de **FELIPE DANILO SANTOS** intitulada: **ESTUDO EXPLORATÓRIO SOBRE A DESTACABILIDADE DE PEÇAS DE AÇO AO CARBONO FABRICADAS POR MADA.**, sob orientação do Prof. Dr. PAULO CESAR OKIMOTO, que após terem inquirido o aluno e realizada a avaliação do trabalho, são de parecer pela sua APROVAÇÃO no rito de defesa.

A outorga do título de mestre está sujeita à homologação pelo colegiado, ao atendimento de todas as indicações e correções solicitadas pela banca e ao pleno atendimento das demandas regimentais do Programa de Pós-Graduação.

Curitiba, 10 de Junho de 2024.

Assinatura Eletrônica

15/07/2024 08:18:48.0

PAULO CESAR OKIMOTO

Presidente da Banca Examinadora

Assinatura Eletrônica

11/07/2024 21:22:30.0

SERGIO LUIZ HENKE

Avaliador Interno (UNIVERSIDADE FEDERAL DO PARANÁ)

Assinatura Eletrônica

14/07/2024 19:42:42.0

LEANDRO JOAO DA SILVA

Avaliador Externo (DEPARTAMENTO DE ENG. MECÂNICA UFPR)

Avenida Coronel Francisco Heráclito dos Santos, 100 - Curitiba - Paraná - Brasil

CEP 81531-980 - Tel: (41) 3361-3123 - E-mail: ufprppgem@gmail.com

Documento assinado eletronicamente de acordo com o disposto na legislação federal Decreto 8539 de 08 de outubro de 2015.

Gerado e autenticado pelo SIGA-UFPR, com a seguinte identificação única: 380354

Para autenticar este documento/assinatura, acesse <https://siga.ufpr.br/siga/visitante/autenticacaoassinaturas.jsp> e insira o código 380354

AGRADECIMENTOS

Agradeço a DEUS pela energia e força dada para alcançar meus objetivos.

Agradecimento especial a minha mãe Auridéia Santos.

A UFPR pelo curso de mestrado profissional, visando aproximar o profissional, o mercado de trabalho e a universidade.

Agradeço ao Prof. Dr. Paulo Cesar Okimoto pela oportunidade de me conceder esse projeto, pela confiança, paciência e precisão nas suas observações e sugestões.

Agradeço ao Prof. Dr. Américo Scotti por nos trazer uma das problemáticas do processo de manufatura.

Agradeço ao técnico do laboratório, Derik Werner Fagundes, por ter me ajudado nos testes práticos.

Agradeço ao Prof. Dr. Leandro João da Silva pelas contribuições acadêmicas e por transmitir seu conhecimento em manufatura aditiva.

“Nada do que foi será
De novo do jeito que já foi um dia
Tudo passa, tudo sempre passará
A vida vem em ondas, como no mar
Num indo e vindo infinito”
“Como uma onda no mar”

Composição: Lulu Santos / Nelson Motta.

RESUMO

A MADA (Manufatura Aditiva por Deposição a Arco) é traduzida do inglês WAAM (*Wire and Arc Additive Manufacturing*), consiste em fabricar peças a partir do processo de soldagem a arco elétrico, sendo capaz de produzir desde peças simples a peças complexas, tendo como vantagem a menor perda de matéria prima na fabricação do produto final. A MADA está em um crescimento exponencial no mercado internacional em diversos ramos da indústria, tais como automotiva, construção naval, petrolíferas, mineração, e demais áreas da metalmeccânica. Como base do crescimento rápido dessa tecnologia, em diversas dessas áreas verificou-se uma problemática comum, que é a separação do metal base (substrato) da peça fabricada via MADA. Atualmente, para remover as peças MADA do metal base, emprega-se o corte a serra, corte a fio ou usinagem, o que necessita de mão de obra qualificada e outros processos para essas operações, elevando o tempo para obter a peça acabada e aumenta o custo da fabricação. A fim de diminuir custos e tempo no processo, o presente trabalho propõe desenvolver alguns métodos capazes de facilitar a separação da peça MADA do metal base. Foram aplicados no laboratório alguns revestimentos utilizando-se de processos como brasagem, aspersão térmica e soldagem a arco. Dentre os materiais usados para o revestimento, trabalhou-se com os materiais de foscooper, alumínio, cobre. E realizado a fabricação da peça MADA diretamente sobre o metal base de Ferro Fundido como alternativa. Após a fabricação da peça MADA, foram realizados testes de destacabilidade, e, dentre alguns desses revestimentos, como o MIG-Brazing e a MADA sobre metal base de Ferro Fundido foram obtidos bons resultados.

Palavras-chave: manufatura aditiva a arco (MADA); revestimentos; processo de soldagem; aspersão térmica.

ABSTRACT

One of the problems of the metalworking industry in relation to the manufacturing of metallic parts is the high costs and high losses of materials in the process of manufacturing the part through these manufacturing processes, such as: Casting, forming, forging and others. Additive manufacturing by arc deposition (MADA) is a recent method of manufacturing parts in relation to these other processes mentioned above. MADA is capable of producing everything from simple to complex parts, with the advantages of less loss of raw materials in the manufacture of the final product. MADA is experiencing exponential growth in the international market in various branches of industry such as automotive, shipbuilding, piping, mining, and other areas of metal mechanics. As a basis for the rapid growth of this technology in several of these areas, a common problem was found, which is the separation of the base metal from the three-dimensional part. Currently, laser cutting, wire cutting or machining is used to remove three-dimensional parts from the base metal, which increases the cost of manufacturing, in addition to increasing the time to obtain the finished part. In order to reduce costs and time in the process, this work proposes to develop some coatings capable of facilitating the detachability of the MADA from the base metal. Some coatings were developed in the laboratory using processes such as brazing, thermal spraying and arc welding. Among the materials used for the coating, we worked with foscoper materials, aluminum, copper, and the manufacture of the MADA piece directly on the Cast Iron base metal. After manufacturing MADA, detachability tests were carried out, and, among some of these coatings, such as MIG-Brazing and MADA on Cast Iron base metal, good results were obtained.

Keywords: arc additive manufacturing (MADA); coatings; welding process; thermal spraying.

LISTA DE FIGURAS

FIGURA 1 - História da manufatura aditiva (MA).	15
FIGURA 2 - Representação esquemática da manufatura aditiva.....	16
FIGURA 3 - Processo mig-mag cmt robotizada.	18
FIGURA 4 - Poça de fusão mig-mag.....	22
FIGURA 5 - Equipamento mig brazing.....	23
FIGURA 6 - Processo mig-mag cmt realizada por célula robotizada.	24
FIGURA 7 - Processo de brasagem por chama.....	26
FIGURA 8 - Características do revestimento por aspeção térmica.....	27
FIGURA 9 - Tocha de aspersão por fusão fs.	28
FIGURA 10 - Equipamento de impactro charpy.	32
FIGURA 11 - Formato das camadas mada.....	44
FIGURA 12 - Diagrama de fase fe-cu.	66
FIGURA 13 - Gráfico da microdureza da parede mada sobre foscofer aspergido.	70
FIGURA 14 - Gráfico da microdureza da parede sobre mig-brazing.....	79
FIGURA 15 - Gráfico da microdureza da parede mada sobre o ferro fundido.	88

LISTA DE FOTOGRAFIAS

FOTOGRAFIA 1 - Hélice do navio no processo de fabricação MADA.	19
FOTOGRAFIA 2 - Ponte em aço inoxidável no processo MADA.	20
FOTOGRAFIA 3 - Peça MADA sobre o metal base.	29
FOTOGRAFIA 4 - Corte a serra para separação da peça MADA.	30
FOTOGRAFIA 5 - Corte a serra para separação da peça MADA.	30
FOTOGRAFIA 6 - Corpo de prova de aço baixo carbono.	34
FOTOGRAFIA 7 - Corpo de prova de Ferro Fundido.	35
FOTOGRAFIA 8 - Processo de brasagem oxi-acetilênica.	38
FOTOGRAFIA 9 - Equipamento de aspersão térmica fs.	40
FOTOGRAFIA 10 - Robô de soldagem.	42
FOTOGRAFIA 11 - Teste de martelamento.	45
FOTOGRAFIA 12 - Corte transversal na parede mada.	46
FOTOGRAFIA 13 - Revestimento de foscofer brasado.	48
FOTOGRAFIA 14 - Revestimento de foscofer aspergido.	49
FOTOGRAFIA 15 - Revestimento de alumínio aspergido.	50
FOTOGRAFIA 16 - Revestimento de MIG-Brazing aplicado a arco elétrico.	51
FOTOGRAFIA 17 - Revestimento de arame ER70S-6 aplicado a arco elétrico.	52
FOTOGRAFIA 18 - MADA sobre revestimento de Foscofer aspergido.	53
FOTOGRAFIA 19 - MADA sobre revestimento de Foscofer aspergido.	54
FOTOGRAFIA 20 - MADA sobre revestimento de Alumínio aspergido.	55
FOTOGRAFIA 21 - MADA sobre revestimento de MIG-Brazing aplicado a arco elétrico.	56
FOTOGRAFIA 22 - MADA sobre revestimento de arame ER70S-6 aplicado a arco elétrico.	57
FOTOGRAFIA 23 - MADA sobre o corpo de prova de Ferro Fundido.	58
FOTOGRAFIA 24 - Destacamento da parede MADA do revestimento de foscofer brasado.	59
FOTOGRAFIA 25 - Macrografia da seção transversal da parede MADA do revestimento de foscofer brasado.	60
FOTOGRAFIA 26 - Metalografia das interfaces da parede MADA x revestimento x corpo de prova.	61
FOTOGRAFIA 27 - Interface entre a parede MADA e o revestimento.	62

FOTOGRAFIA 28 - Interface entre o revestimento e o corpo de prova.....	62
FOTOGRAFIA 29 - Destacamento da parede MADA do revestimento de foscoper aspergido.....	63
FOTOGRAFIA 30 - Macrografia da secção transversal da parede MADA do revestimento de Foscoper aspergido.	64
FOTOGRAFIA 31 - Metalografia da 1ª camada envolvida pelo revestimento.	65
FOTOGRAFIA 32 - Metalografia ampliada da 1ª camada envolvida pelo revestimento.....	67
FOTOGRAFIA 33 - Metalografia do detalhe a das trincas da 2ª camada.	68
FOTOGRAFIA 34 - Micrografia ampliada das trincas na 2ª camada.	68
FOTOGRAFIA 35 - Micrografia da interface do revestimento ao corpo de prova.	69
FOTOGRAFIA 36 - Destacamento da parede mada do revestimento de Alumínio aspergido.....	71
FOTOGRAFIA 37 - Estrutura da parede MADA do revestimento de Alumínio aspergido.....	72
FOTOGRAFIA 38 - Destacamento da parede MADA do revestimento de MIG-BRAZING.	73
FOTOGRAFIA 39 - Macrografia da parede MADA sobre o revestimento de MIG - BRAZING.	74
FOTOGRAFIA 40 - Micrografia do perfil trapezoidal da 1ª camada da parede MADA.....	75
FOTOGRAFIA 41 - Micrografia do formato da parede MADA de MIG-Brazing.....	76
FOTOGRAFIA 42 - Micrografia da 1ª camada da parede MADA.....	77
FOTOGRAFIA 43 - Micrografia ampliada da 1ª camada da parede MADA.	77
FOTOGRAFIA 44 - Micrografia da 4ª camada da parede MADA.....	78
FOTOGRAFIA 45 - Micrografia ampliada da 4ª camada da parede MADA.	78
FOTOGRAFIA 46 - Destacamento da parede MADA do revestimento de arame ER70S-6.....	80
FOTOGRAFIA 47 - Macrografia do Ferro Fundido.....	81
FOTOGRAFIA 48 - Destacamento da parede MADA do corpo de prova de Ferro Fundido.	82
FOTOGRAFIA 49 - Macrografia da parede MADA sobre o Ferro Fundido.	83
FOTOGRAFIA 50 - Metalografia ampliada da 1ª camada na região do destacamento.....	84

FOTOGRAFIA 51 - Macrografias da 2ª e 3ª camada da parede MADA de Ferro

Fundido.85

LISTA DE TABELAS

TABELA 1 - Descrição das camadas de revestimentos realizadas a partir dos processos aplicados.....	37
TABELA 2 - Propriedades mecânicas e composição química do Foscooper.....	39
TABELA 3 - Composição química do super flux.....	39
TABELA 4 - Composição química do bt 513.	43
TABELA 5 - Propriedades mecânicas e composição química do arame ER70S-6.	43

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO.	12
1.1	PROBLEMATIZAÇÃO.	13
1.2	HIPÓTESE SIMPLIFICATIVA.	13
1.3	OBJETIVO.	14
1.4	OBETIVO ESPECÍFICO.	14
2	REVISÃO BIBLIOGRÁFICA.	15
2.1	MANUFATURA ADITIVA (MA).	15
2.2	MANUFATURA ADITIVA POR DEPOSIÇÃO A ARCO (MADA).	17
2.3	PROCESSO DE SOLDAGEM A ARCO.	21
2.4	BRASAGEM.	25
	BRASAGEM POR CHAMA.	26
2.5	ASPERSÃO TÉRMICA.	27
	ASPERSÃO POR <i>FLAME SPRAY</i> .	28
2.6	DESTACABILIDADE.	29
2.7	DESTACABILIDADE POR MADA.	31
3	MATERIAIS E MÉTODOS.	33
3.1	MATERIAL BASE.	33
3.2	CORPO DE PROVA DE AÇO BAIXO CARBONO.	34
3.3	CORPO DE PROVA DE FERRO FUNDIDO CINZENTO.	35
3.4	REVESTIMENTOS TESTADOS NOS CORPOS DE PROVA.	36
	BRASAGEM POR CHAMA	37
3.5	REVESTIMENTO DE FOSCOPER APLICADOS POR BRASAGEM OXI-ACETILÊNICA.	38
3.6	REVESTIMENTOS DE FOSCOPER E ALUMÍNIO APLICADOS POR ASPERSÃO TÉRMICA.	40
3.7	REVESTIMENTOS APLICADOS POR ARCO ELÉTRICO ATRAVÉS PELO ROBÔ DE SOLDAGEM.	42
3.8	CONSTRUÇÃO DAS CAMADAS VIA MADA.	44
3.9	ENSAIO QUALITATIVO DE DESTACABILIDADE.	45
3.10	ANÁLISES MACROGRÁFICAS E METALOGRÁFICAS.	46
3.11	ENSAIO DE MICRODUREZA.	46
4	RESULTADOS.	47

4.1	RESULTADOS DOS REVESTIMENTOS APLICADOS POR BRASAGEM, ASPERSÃO TÉRMICA E ARCO ELÉTRICO.....	47
	Revestimento de Foscofer aspergido - (91,7%cu-8,3%p).....	49
	Revestimento de MIG-Brazing. (cu-3%si).....	51
	Revestimento de arame ER70S-6 - (aramé cobreado).....	52
4.2	RESULTADO DAS DEPOSIÇÕES DAS PAREDES MADA SOBRE OS REVESTIMENTOS.....	53
	MADA sobre revestimento de foscofer aspergido.....	54
	MADA sobre revestimento de alumínio aspergido.....	55
	MADA sobre revestimento de MIG-Brazing.....	56
	MADA sobre revestimento de arame ER70S-6.....	57
4.3	RESULTADOS DOS DESTACAMENTOS DAS PAREDES MADA. ANÁLISES DAS MACROGRAFIAS, MICROGRAFIAS E MICRODUREZA.....	59
5	DISCUSSÃO.....	89
6	CONCLUSÃO.....	95
7	REFERÊNCIAS.....	97

1 INTRODUÇÃO.

A demanda de produtos no setor metalmeccânico no mercado nacional e internacional cresce anualmente, esse crescimento é acompanhado por uma série de requisitos impostos pelas fábricas como, menor tempo de fabricação, diminuição de custos, perdas de materiais e aumento da qualidade dos produtos. Para suprir essas necessidades fabris, a automatização industrial está sendo amplamente utilizada para diminuir o tempo de fabricação reduzindo custos e obtendo melhor qualidade no produto final. Um dos assuntos com crescente enfoque no processo de soldagem por robôs é a manufatura aditiva por deposição a arco (MADA), tipicamente conhecida na nomenclatura em inglês como *Wire and Arc Additive Manufacturing (WAAM)*, onde esses robôs estão se tornando um grande aliado na automação industrial. (Novelino *et al.*, 2021). Estes robôs de soldagem auxiliam na chamada manufatura aditiva por deposição a arco, onde as peças são construídas utilizando-se diversas tecnologias de adição de material com alto grau de automação. Essa tecnologia possibilita a fabricação de peças pela deposição de material metálico de camada a camada até a geometria desejada da peça. (Kovalenko, 2019).

A manufatura aditiva por deposição a arco pode criar objetos de diferentes tipos e formas em materiais metálicos, além de possuir uma maior eficiência quando comparada aos modos de manufatura, tais como: usinagem, fundição ou conformação. (Xiong; Yin; Zhang, 2016). O processo MADA surgiu como possível solução para atender requisitos de qualidade, tempo de produção de economia e de recursos (matéria prima). Esta alternativa vem em crescente desenvolvimento tanto no campo acadêmico-científico quanto no campo metalmeccânico industrial. (Kovalenko, 2019).

1.1 PROBLEMATIZAÇÃO.

Uma das grandes dificuldades do processo MADA, é que para iniciar o depósito das camadas para a fabricação das peças é necessário que isso seja realizado sobre um metal base de material similar a peça MADA. Ao término da peça fabricada há necessidade de separá-la do metal base, o que na maioria dos casos não é uma tarefa simples pois requer outros processos, como cortes e/ou usinagem e mão de obra qualificada, gerando assim custos consideráveis com maior tempo na fabricação e algumas das vezes, perda do metal base.

1.2 HIPÓTESE SIMPLIFICATIVA.

Neste contexto, o trabalho busca apresentar alternativas para facilitar o destacamento da peça produzida por MADA do metal base. Para esse fim, serão realizados diversos estudos de possibilidades, enfocando principalmente a utilização de revestimentos sobre o metal base que facilitem este destacamento. Estes revestimentos têm como finalidade criar uma barreira física de baixa espessura, a qual facilitaria o destacamento por reduzir a força necessária para tal tarefa, ocasionar uma fragilização nesta interface e de impedir a ligação metalúrgica entre o metal base e os depósitos realizados via MADA.

1.3 OBJETIVO.

O objetivo geral deste trabalho é de explorar algumas possibilidades para realizar o destacamento da peça MADA do metal base. Entre estas possibilidades estar o uso de revestimentos sobre o metal base, assim como o ferro fundido que não necessitou da aplicação de revestimento.

1.4 OBJETIVO ESPECÍFICO.

Explorar opções em termos de material de revestimento, processo de aplicação, técnicas e parâmetros para aplicar revestimentos a fim de realizar a destacabilidade da peça fabricada via MADA, e em um caso a aplicação direta da peça MADA ao corpo de prova. Serão estudados alguns tipos de revestimentos, tais como ligas de cobre, alumínio, ferro fundido etc. Utilizando-se diferentes processos e técnicas para depositá-los sobre o metal base, como por exemplo, brasagem, aspersão térmica e soldagem a arco.

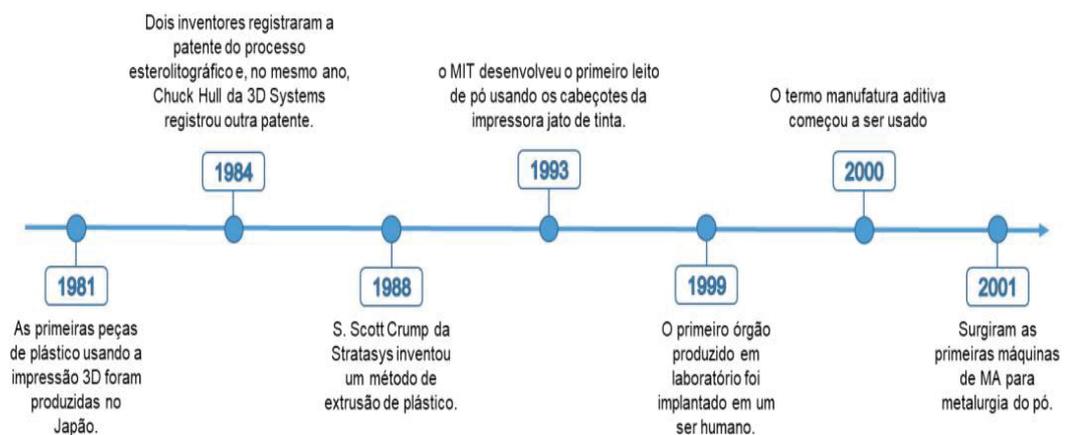
2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA.

Neste capítulo será apresentada uma revisão de trabalhos relevantes a respeito do tema de manufatura aditiva, direcionando para a fabricação de peças metálicas pelo processo MADA, com o propósito de aplicação de revestimentos no metal base através de processos de brasagem, aspersão térmica e arco elétrico MIG/MAG. Além disso, serão exploradas técnicas aplicadas para embasamento da metodologia e entendimento dos resultados a serem apresentados.

2.1 MANUFATURA ADITIVA (MA).

Em 1981, o japonês Hideo Kodama teve a ideia de fazer uma impressão tridimensional, com base numa tecnologia de polímero foto curável. Contudo, sua ideia somente se tornou realidade doze anos depois, quando um grupo do *Massachusetts Institute of Technology* (MIT) desenvolveu o primeiro processo em leito de pó, usando cabeçotes de uma impressora de jato de tinta (OMNE, 2018). A FIGURA 1 mostra uma breve sequência dos acontecimentos históricos relacionados à manufatura aditiva.

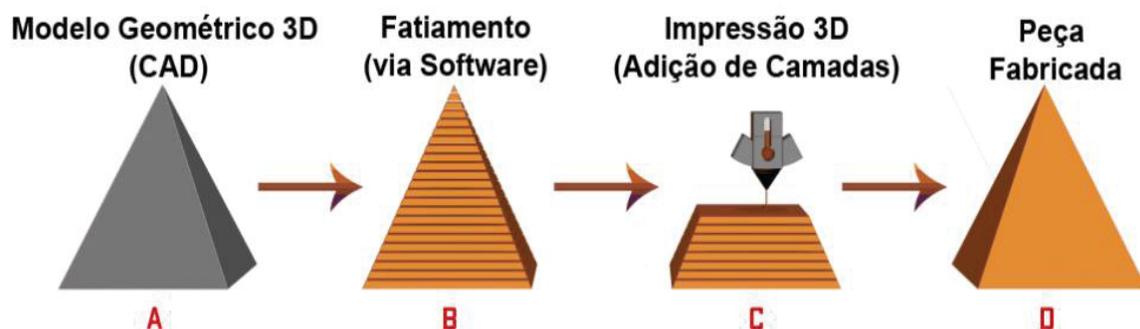
FIGURA 1 - HISTÓRIA DA MANUFATURA ADITIVA (MA).



FONTE: Adaptado de Omne (2018).

As técnicas de manufatura aditiva seguem basicamente o mesmo processo: A - elaboração do modelo virtual da peça a ser produzido por software CAD; B - conversão do formato do modelo virtual para um formato reconhecido pelas impressoras, onde o modelo da futura peça é fatiado gerando informações para os traçados de cada camada; C - em seguida, inicia-se a construção da peça, camada a camada, com a adição da matéria prima de polímeros ou metálicas; D - por fim, é realizado o pós-processamento com o acabamento e limpeza da peça (Karapatis; Van Griethuysen; Glardon, 1998). A FIGURA 2 mostra essa representação esquemática da manufatura aditiva.

FIGURA 2 - REPRESENTAÇÃO ESQUEMÁTICA DA MANUFATURA ADITIVA.



FONTE: Studio Leão 3D (2022).

A manufatura aditiva contempla várias técnicas para a fabricação da peça 3D de polímeros e metálicas, são estas: Fusão em leito de pó (FLP); Jato de ligante (JL); Deposição com energia direcionada (DED). Dentre esses processos, o presente trabalho irá focar na deposição por energia direcionada (DED).

Segundo a norma ASTM F3187 (2016), pode-se definir DED como a utilização de energia térmica concentrada para fundir um material de adição enquanto ele é seletivamente depositado sobre um metal base ou peça pré-existente, podendo utilizar-se de célula híbrida (deposição + usinagem).

A DED compreende várias categorias de fonte de energia que usam desde feixe de laser, feixe de elétrons a fontes a arco no processo de fusão, utilizando-se da matéria prima no formato de arame ou pó. Outra característica é a proteção, que varia de uma proteção gasosa inerte na poça de fusão do arco e do laser enquanto no feixe de elétrons a proteção é a vácuo. O foco deste trabalho concentra-se dentro do processo de manufatura aditiva a arco, utilizando-se do subprocesso MIG/MAG CMT para realizar as camadas de cordão de solda na fabricação da peça MADA.

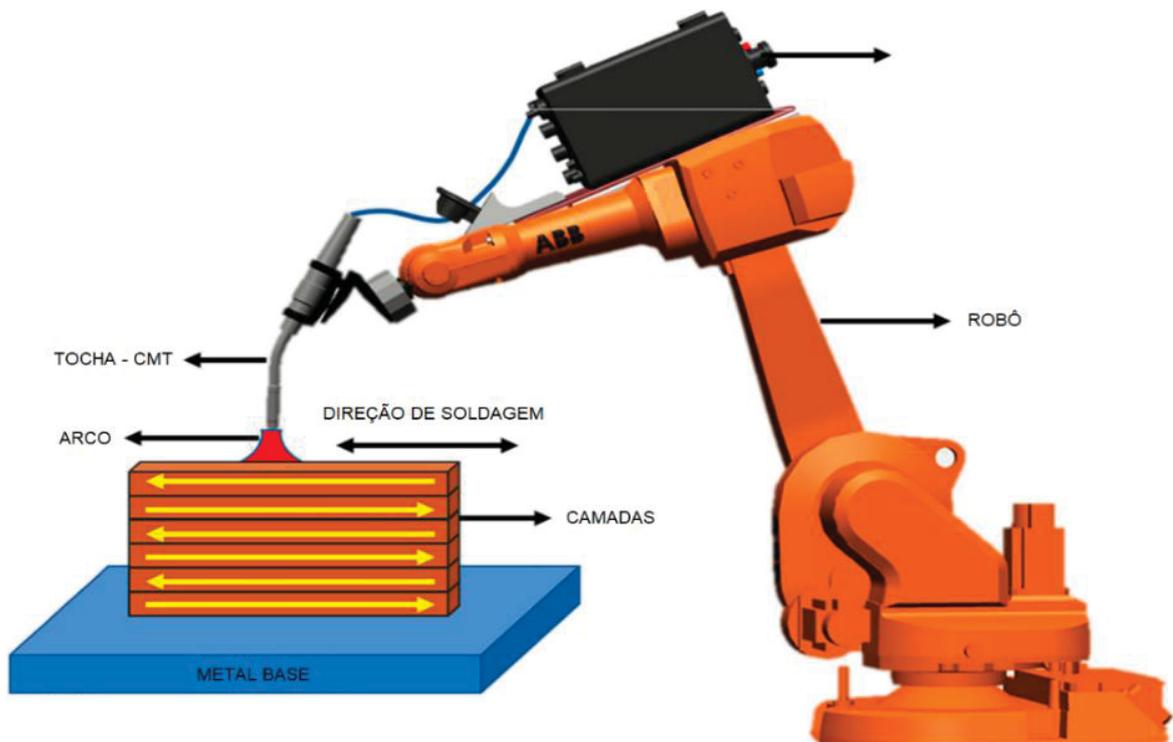
2.2 MANUFATURA ADITIVA POR DEPOSIÇÃO A ARCO (MADA).

O processo de Manufatura Aditiva por Deposição a Arco (MADA), também conhecido como *Wire Arc Additive Manufacturing* (WAAM) em inglês, é uma técnica de fabricação que opera em um princípio de fabricação de peças tridimensionais camada por camada. Utilizando-se para essa aplicação os processos de soldagem a arco convencionais para a deposição do material em camadas. A MADA oferece um controle dimensional preciso, eliminando a necessidade de moldes, como na fundição, ou matrizes, como na conformação mecânica.

A fabricação via MADA é produzidos através de subprocessos a arco, tais como; TIG (*Tungsten Inert Gas*), PTA (*Plasma Transfer Arc*) e MIG-MAG (MIG - *Metal Inert Gas* e MAG - *Metal Active Gas*). Esses processos utilizam uma fonte de arco elétrico para gerar uma poça de fusão, na qual o material de adição, geralmente na forma de arame ou eletrodo, é depositado sobre o metal base. Esses processos oferecem altas taxas de deposição, baixo custo e resultam em uma estrutura sólida e consistente no qual é um dos objetivos do processo MADA.

Uma observação importante é que o elevado aporte de calor na Manufatura Aditiva por Deposição a Arco (MADA), pode resultar em altas tensões residuais e distorções na peça fabricada. Esse fenômeno tende a causar uma diminuição na precisão dimensional e um aumento na rugosidade da superfície das peças produzidas. Após a conclusão da fabricação do componente, é frequente observar ondulações significativas na superfície, tornando necessárias operações de usinagem para obter o acabamento superficial desejado. Na FIGURA 3 a seguir, é possível observar a fabricação de uma "parede MADA". Neste trabalho, foi realizado o processo de fabricação da peça MADA seguindo essa geometria específica, utilizando o robô de soldagem ABB com fonte de arco Fronius CMT pelo subprocesso MIG-MAG.

FIGURA 3 - PROCESSO MIG-MAG CMT ROBOTIZADA.



FONTE: Fronius (2005).

Na FOTOGRAFIA 1, temos um exemplo de fabricação usando o processo MADA. A hélice fabricada por manufatura aditiva no Laboratório de Impressão 3D de Rotterdam, a qual, antes de ser certificada pelo Bureau Veritas, foi testada em um navio. O objetivo do projeto é demonstrar a eficácia da manufatura aditiva na indústria naval a fim de incentivar a utilização da tecnologia.

Através da técnica de impressão 3D de peças metálicas é possível que reparos ou peças de reposição sejam feitos diretamente no porto, de maneira mais rápida, o que impede que ocorram atrasos na fabricação, além de reduzir os custos de estoque. Dessa forma, isso constitui uma novidade que poderá acelerar a utilização dessa tecnologia na construção naval (Marinha Protais, 2017)

FOTOGRAFIA 1 - HÉLICE DO NAVIO NO PROCESSO DE FABRICAÇÃO MADA.



FONTE: Usinenouvelle (2017).

Outro exemplo é ilustrado na FOTOGRAFIA 2, que mostra uma ponte de aço inoxidável totalmente funcional impressa pela empresa MX3D com o propósito de atravessar o *Oudezijds Achterburgwal*, um dos canais mais antigos no centro de Amsterdã. O projeto da Ponte MX3D demonstra as potenciais aplicações da tecnologia de Manufatura Aditiva por Deposição a Arco (MADA), destacando como essa técnica permite a impressão em 3D de estruturas de metal complexas e, ao mesmo tempo, elegantes (Cunha, 2023).

FOTOGRAFIA 2 - PONTE EM AÇO INOXIDAVEL NO PROCESSO MADA.



FONTE: stylourbano.com.br (2023).

2.3 PROCESSO DE SOLDAGEM A ARCO.

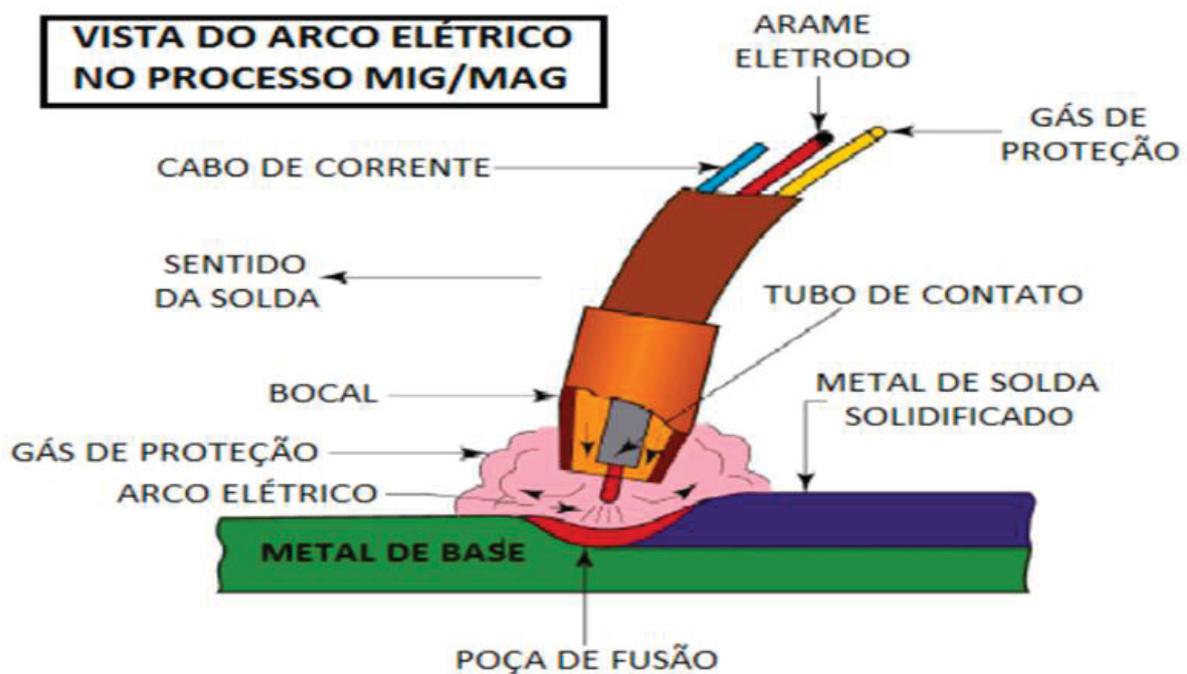
Dentre os processos de soldagem a arco, destaca-se para este presente trabalho, o processo de soldagem MIG-MAG e sua variante MIG-BRAZING.

O processo é identificado tecnicamente pela sigla em inglês GMAW (*Gas Metal Arc Welding*), comumente chamado de soldagem MIG-MAG (*Metal Inert Gas e Metal Active Gas*). Uma de suas variantes, MIG-BRAZING, segue o mesmo princípio de funcionamento e usa do mesmo maquinário, sendo a diferença o arame/eletrodo e o gás de proteção. Como vantagens, estes processos podem soldar em todas as posições, podendo-se obter cordões extensos por causa da alimentação contínua do arame sem muitas interrupções e sem existência de escória, além de elevadas taxas de deposição e de velocidades de soldagem.

O processo consiste em uma alimentação constante de um arame consumível (arame/eletrodo) de polaridade positiva e de polaridade negativa no metal base. Quando o arame consumível entra em contato com o metal de base, ocorre o fechamento do circuito, permitindo a fusão do arame no metal base, formando uma poça de fusão, e durante esse processo utiliza-se de uma proteção gasosa (Modenesi,2012).

Os metais aquecidos até atingirem a temperatura de fusão formam o que é conhecido como "poça de fusão", como ilustrado na FIGURA 4. Esta poça de fusão é mantida sob uma atmosfera protetora gasosa, que normalmente é o argônio e/ou hélio para processo de MIG, e mistura de argônio e oxigênio, argônio e CO₂ e CO₂ puro para processo de MAG. Parte dessa poça de fusão é formada pela fusão do metal de adição, geralmente na forma de arame, com o metal base. Após a fusão, a poça é resfriada, permitindo a solidificação dos metais e sua união. (Kovalenko, 2019).

FIGURA 4 - POÇA DE FUSÃO MIG-MAG.

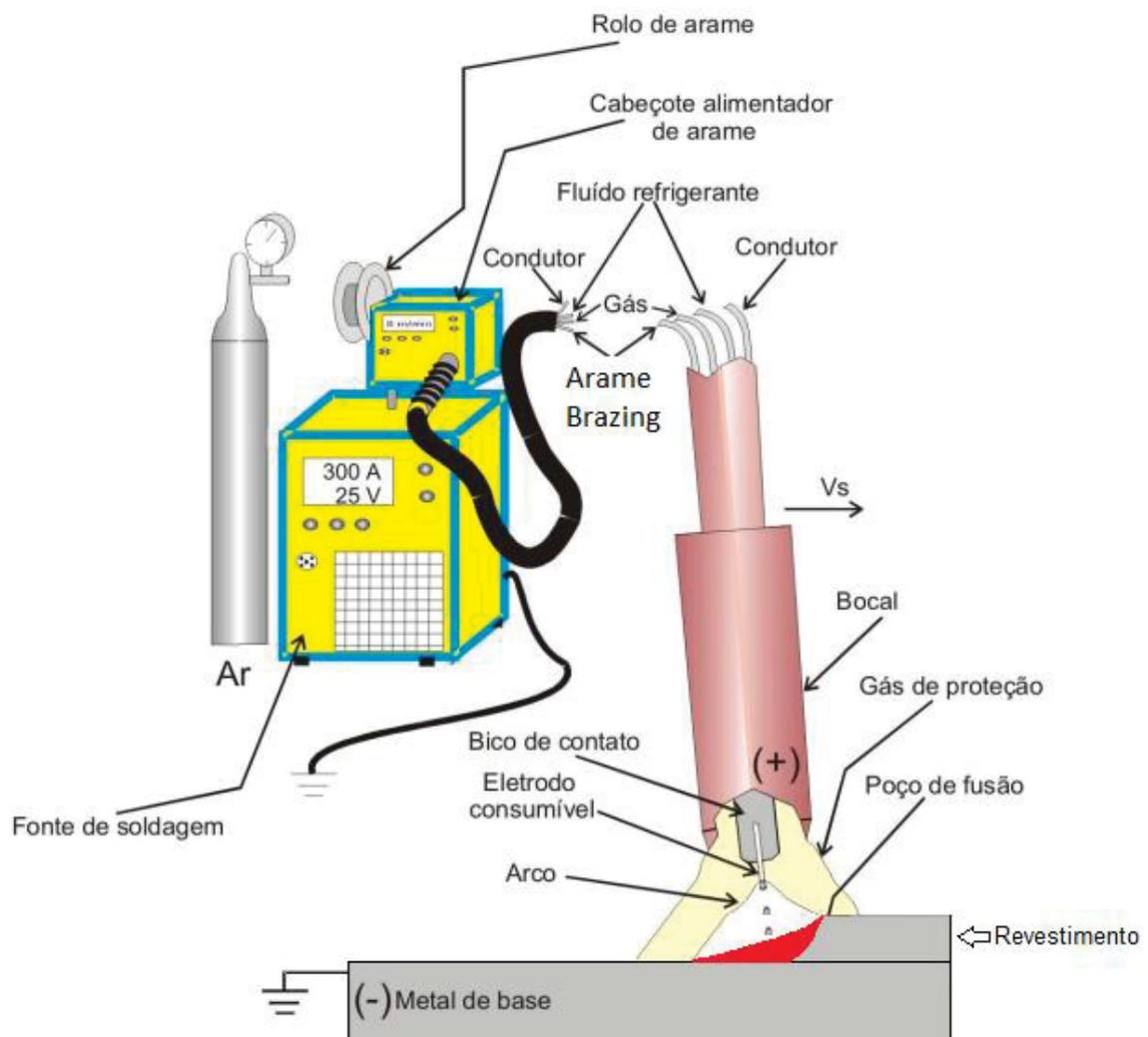


FONTE: Ferramentaspt (2012).

O processo "MIG-Brazing", utiliza-se do mesmo equipamento do processo GMAW, conciliando dessa forma as vantagens da brasagem com a alta deposição de material e alta velocidade de soldagem. O processo de brasagem MIG oferece a vantagem de ser aplicável em diversas posições de soldagem, diminuindo o aporte de calor com baixa tensão residual, e apresentando boa fluidez e mobilidade. A Brasagem MIG pode ser utilizada para unir peças de pequena espessura em materiais similar e dissimilares, porém, é importante que o metal de adição possua similaridade metalúrgica com ambos os metais base. (Guimarães *et al.*, 2006; Muthuraju; Kumar, 2020).

O material do arame eletrodo a ser escolhido está diretamente ligado aos requisitos de resistência mecânica da junta brasada, assim como as especificações de sua composição química. O metal de adição empregado deve ser escolhido de acordo com o metal de base a ser unido, as condições de superfície, a espessura e detalhe da junta e suas especificações (Mendes, 2005). O Cu-Si possui uma propriedade de grande interesse na aplicação do processo “MIG-Brazing”, pois ele aumenta a molhabilidade da liga fundida, de forma a auxiliar no desempenho do processo (Ferreira, 2023). (FIGURA 5).

FIGURA 5 - EQUIPAMENTO MIG BRAZING.

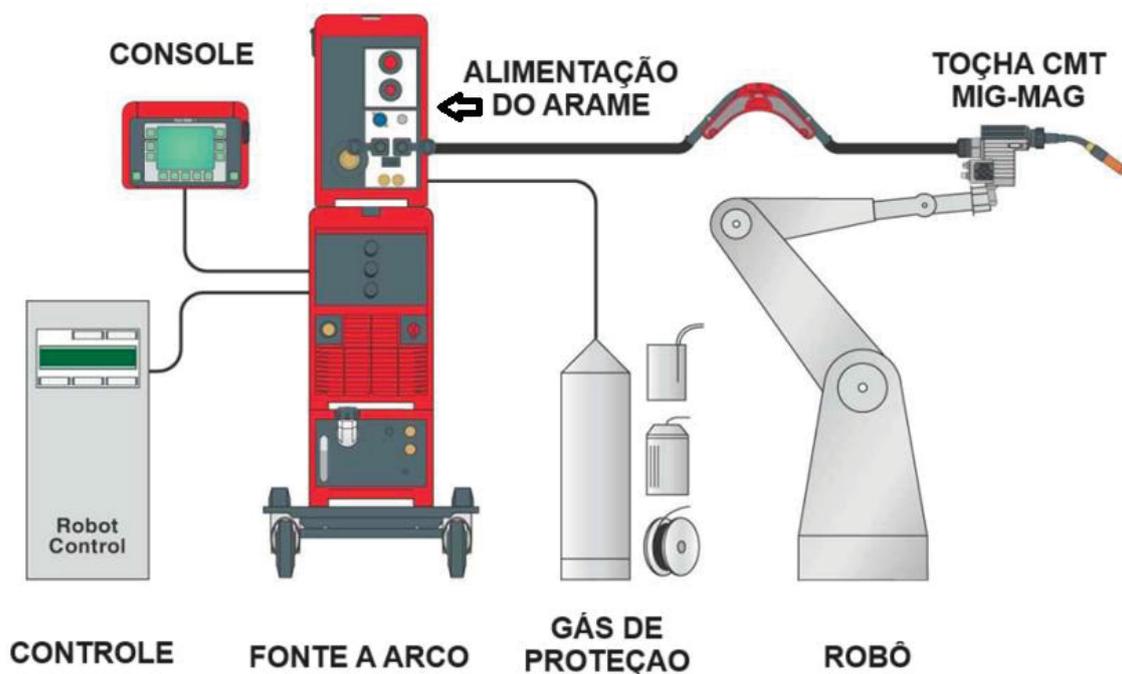


FONTE: Adaptado para Brazing de Mendakiewicz (2014).

Outro processo utilizado é o MIG-MAG - CMT (*Cold Metal Transfer*), com patente solicitada em 2005 pela empresa Fronius (Schorghuber, M. 2009), O processo utilizado neste trabalho não somente para a aplicação dos revestimentos como também para a fabricação da peça via MADA. Na FIGURA 6 é apresentado o esquema de tal processo.

O sistema CMT reverte a alimentação do arame-eletrodo (para frente e para trás), por meio de cada curto-circuito, em seguida, a fonte interrompe o fornecimento de energia, recua o arame-eletrodo, separando a gota metálica da ponta do arame para poça de fusão, garantindo uma transferência de forma suave. Este processo utiliza um arco curto com a corrente de curto-circuito limitada a um nível muito baixo, o que implica em aporte térmico também muito baixo (Magalhães, 2012).

FIGURA 6 - PROCESSO MIG-MAG CMT REALIZADA POR CÉLULA ROBOTIZADA.



FONTE: Fronius (2005).

Este mecanismo de alimentação dinâmica fornece uma enorme vantagem ao processo CMT em relação ao nível de respingos quando comparada à soldagem MIG/MAG por curto-circuito tradicional. A detecção e o ajuste do arco voltaico ocorrem mecanicamente, ou seja, o arco voltaico permanece estável, por esta razão, este processo de solda pode ser aplicado em qualquer lugar ou em qualquer posição (Rocha, 2010), sendo o processo uma opção para manufatura a arco.

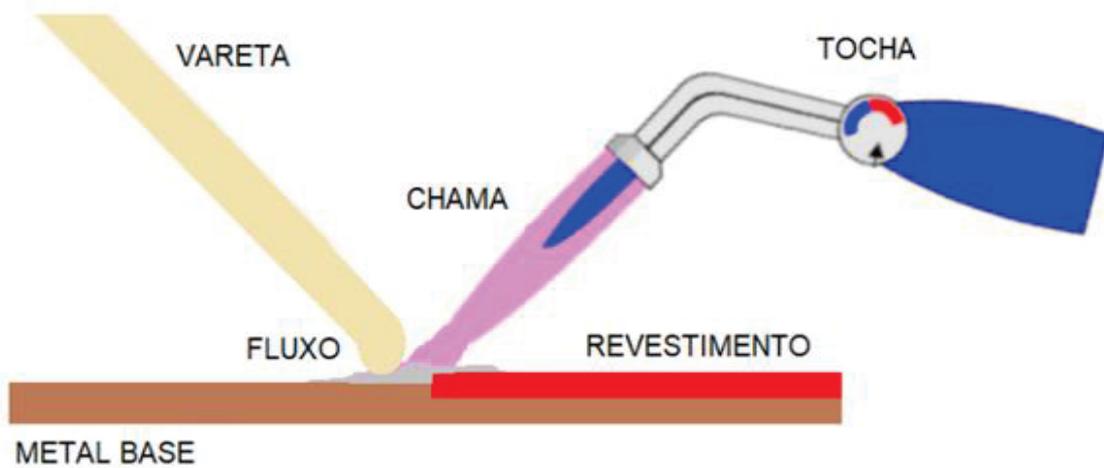
2.4 BRASAGEM.

A técnica de brasagem é reconhecida como uma das formas mais antigas de unir materiais, excluindo os métodos mecânicos. Apesar de sua origem ser antiga, a brasagem ainda é extensivamente empregada em diversas aplicações. Essa técnica é amplamente utilizada em vários setores como na fabricação de autopeças, refrigeradores, trocadores de calor, componentes aeronáuticos e aeroespaciais, bem como em componentes eletrônicos. Além disso, a brasagem possibilita a união de materiais diferentes, como metais e cerâmicas, o que muitas vezes é desafiador de ser alcançado por meio de técnicas de soldagem por fusão (FERNANDES, 2001; OKIMOTO, 2013). Os processos de brasagem abrangem algumas formas de aplicação, entre os mais relevantes na indústria estão a brasagem por chama, por indução, por forno, resistência e por infravermelho. Sendo neste trabalho utilizado a brasagem por chama.

Brasagem por chama.

Na brasagem por chama a fonte de calor é uma chama gerada pela queima de uma mistura de gases. A mistura comumente empregada é o acetileno como combustível e o oxigênio como comburente. O metal de adição é selecionado de acordo com o metal base, e o fluxo utilizado nesse processo tem como objetivo melhorar a molhabilidade e a aderência da junta brasada ou do revestimento (Inforsolda, 2022). A FIGURA 7 ilustra o processo de brasagem por chama.

FIGURA 7 - PROCESSO DE BRASAGEM POR CHAMA.

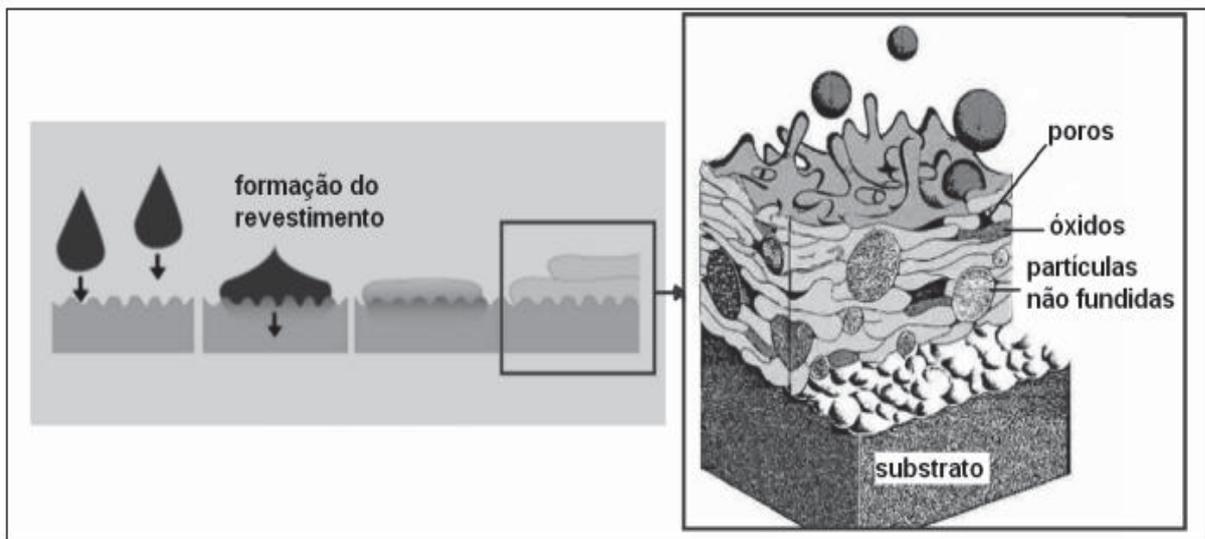


Fonte: O autor (2024).

2.5 ASPERSÃO TÉRMICA.

Para a aplicação da aspersão térmica, os materiais depositados são levados a um estado fundido ou semifundido através de uma fonte de calor gerada no bico de uma pistola apropriada ao processo. Logo após a fusão, o material na fase de solidificação (em forma de partículas) é acelerado por gases sob pressão contra o substrato que será revestido, tal característica é observado na FIGURA 9. As partículas já depositadas formam camadas e estas camadas formam lamelas (AWS, 1985).

FIGURA 8 - CARACTERÍSTICAS DO REVESTIMENTO POR ASPEÇÃO TÉRMICA.



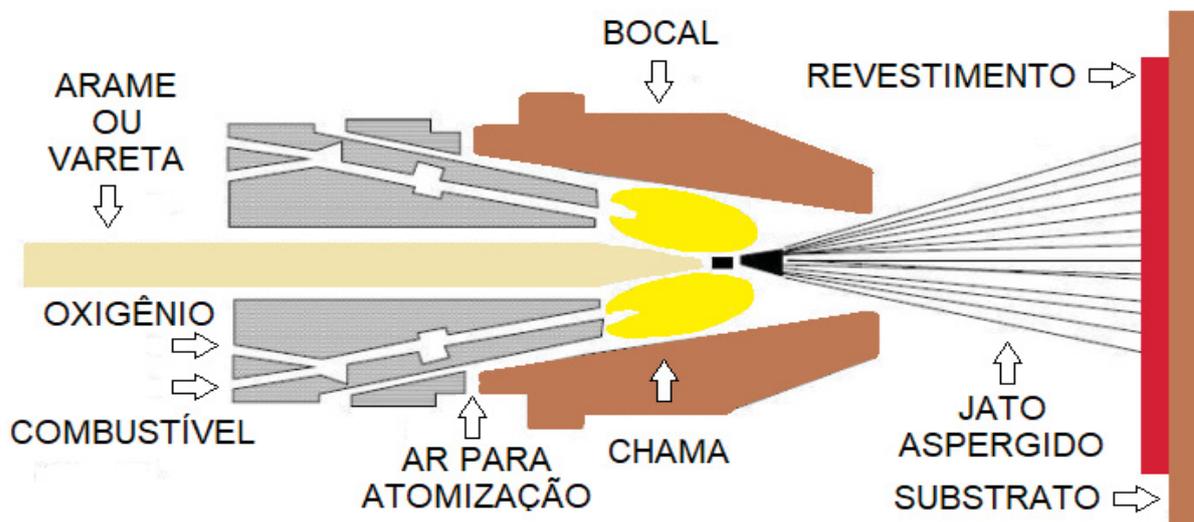
FONTE: Maranhão (2006).

Aspersão por *flame spray*.

O material a ser aplicado através da pistola é na forma de vareta ou arame, no caso do arame, o equipamento deve possuir um sistema de alimentação que pode ser através de roletes que são tracionados por motor elétrico, motor pneumático ou por uma turbina de ar. O motor transfere o arame de forma contínua e concêntrica, alimentando até no bocal que é fundido por uma chama de gás combustível.

Para aspergir o material é utilizado ar comprimido, pois, devido à configuração do bocal, o fluxo de ar é lançado sobre as partículas fundidas, fazendo com que haja a pulverização com maior velocidade até o metal base. Esta energia é aumentada pelo ar comprimido de duas maneiras: pela distribuição de gases combustíveis ao redor do arame para uma fusão uniforme ou por assegurar o tempo suficiente de permanência do arame na chama para uma fusão eficiente. (Paredes, 2012). Esse mecanismo pode ser visto conforme representado na FIGURA 10.

FIGURA 9 - TOCHA DE ASPERSÃO POR FUSÃO FS.

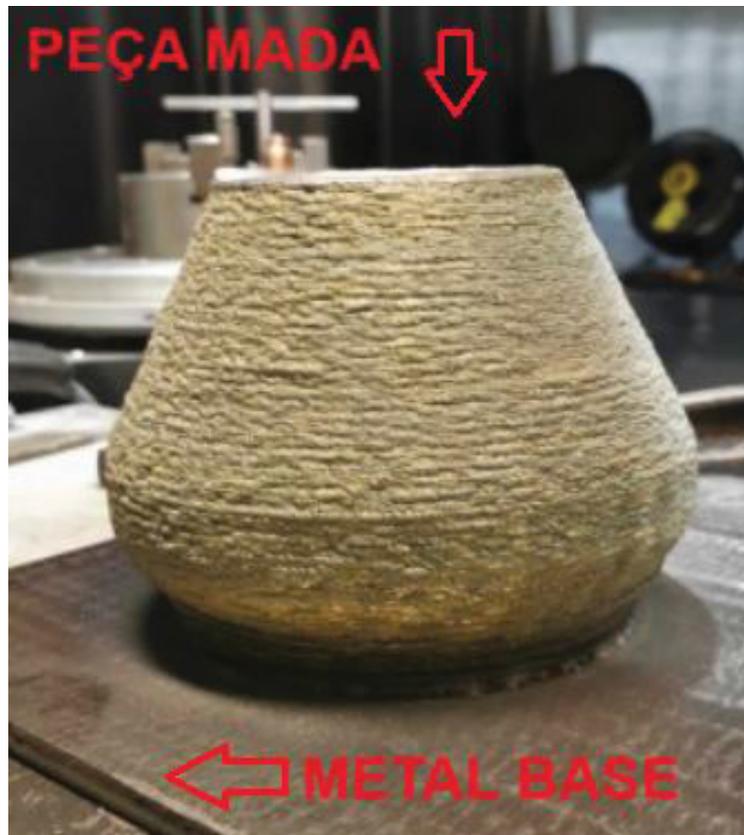


FONTE: Adaptado de Laboratório LABATS – UFPR (2023).

2.6 DESTACABILIDADE.

Um das problemáticas do processo de soldagem da manufatura aditiva a arco é a formação de uma junta forte soldada entre uma peça MADA e o metal base. Essa forte adesão entre a peça e o metal base torna a separação difícil, sendo que, em alguns casos é necessário remover o metal base pois ele não faz parte da peça. A ilustração mostrada na FOTOGRAFIA 3 facilita a visualização da peça MADA sobre o metal base.

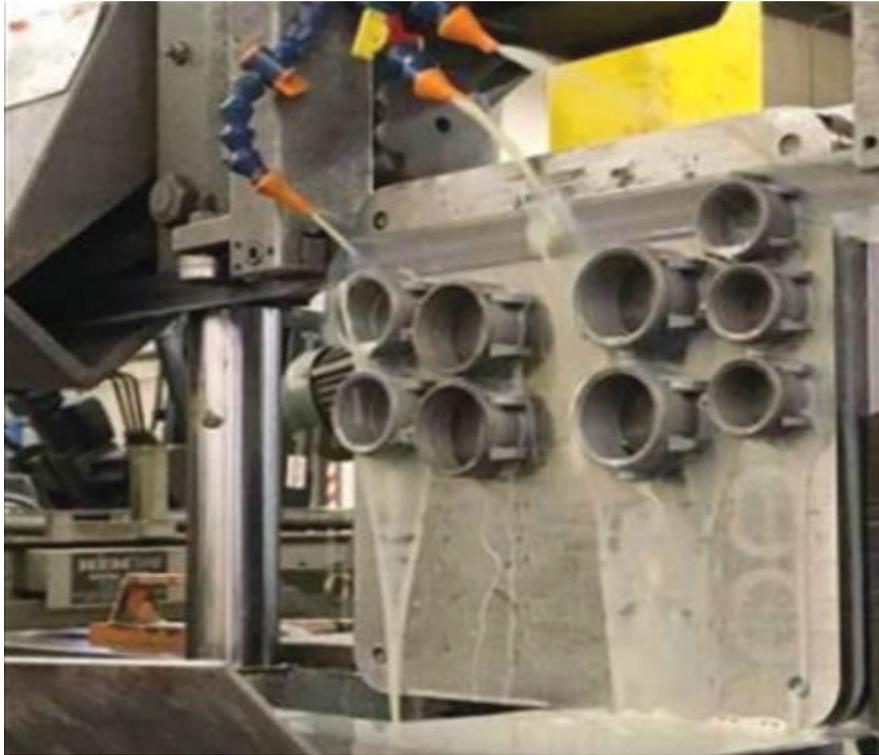
FOTOGRAFIA 3 - PEÇA MADA SOBRE O METAL BASE.



FONTE: Evjemo *et al.* (2022).

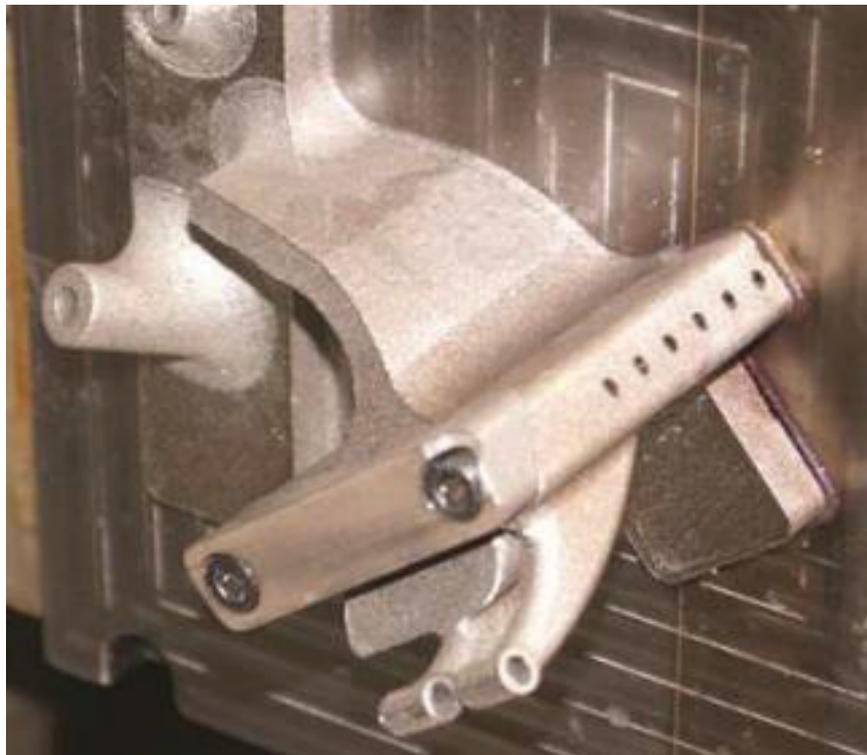
Atualmente para remoção da peça MADA é necessário que se faça um segundo processo, sendo a corte por serra como ilustrado na FOTOGRAFIA 4 ou corte a fio como mostrado na FOTOGRAFIA 5. Além disso, existem outras técnicas de remoção, como por usinagem. No entanto, esses processos podem resultar na perda do metal base após o procedimento. É importante destacar que essas técnicas de remoção adicionais aumentam o custo de fabricação, o tempo de produção e exigem uma qualificação da mão de obra.

FOTOGRAFIA 4 - CORTE A SERRA PARA SEPARAÇÃO DA PEÇA MADA.



FONTE: Simpson *et al.* (2018).

FOTOGRAFIA 5 - CORTE A FIO PARA SEPARAÇÃO DA PEÇA MADA.



FONTE: Simpson *et al.* (2018).

Após ser realizada uma busca na literatura referente a artigos relacionados ao assunto em questão, verificou-se que existem pouco estudo a respeito da destacabilidade, dessa forma, é possível entender a pequena publicação de trabalhos acadêmicos relacionados a destacabilidade no processo de manufatura aditiva a arco, podendo ser entendido por ser uma tecnologia nova no mercado. Dentre poucos trabalhos encontrados, foi selecionado um trabalho a seguir a fim de realçar alguns pontos pertinentes sobre as questões abordadas durante o presente estudo.

2.7 DESTACABILIDADE POR MADA.

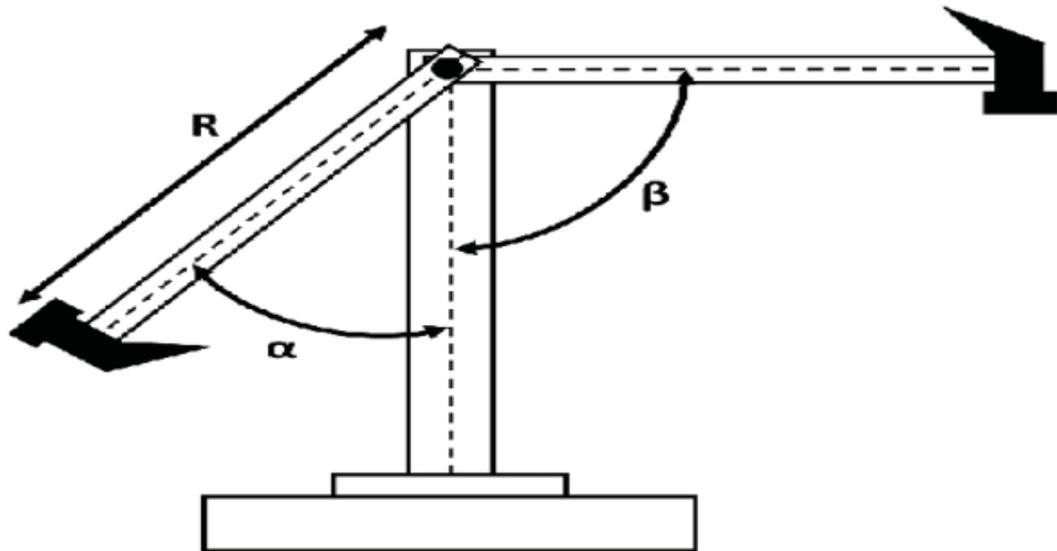
Neste estudo publicado em 12/2015 pelos autores Haselhuhn et al. A destacabilidade permitem que a fabricação da peça MADA de alumínio ER4043, soldadas pelo processo a arco elétrico MIG/MAG, sejam destacadas do metal base de alumínio 1100 e do aço de baixo carbono A36. Nesse estudo, foram usados como revestimentos, óxido de alumínio, nitreto de boro em forma de spray e aplicação direta do metal de adição sobre o metal base.

Os revestimento foi aplicado nos dois tipos de metal base, o revestimento de nitreto de boro à base de aerossol foi pulverizado diretamente nos metais base. O revestimento de óxido de alumínio foi aplicado como uma pasta preparada pela mistura de 100 mL de álcool isopropílico 95% com 27g de pó de óxido de alumínio, foi misturado, aplicado sobre o corpo de prova e aguardado 30 minutos para secar.

O procedimento utilizado na fabricação da peça MADA, segue a seguinte ordem, após a primeira camada com o metal de adição ER4043, realizou-se uma pausa de 10 minutos, tanto no metal base com ou sem revestimento. Após a 2^a, 3^a, 4^a e 5^a camadas foram feitas pausas de 60 segundos, e nas camadas seguintes pausas de 2 minutos, subsequentemente. Essas pausas foram realizadas para permitir que a amostra resfriasse o suficiente para manter a tolerância dimensional e para evitar o superaquecimento do cordão de solda.

Após as impressões, foram realizados testes de impacto em cada amostra, utilizando-se um testador de impacto Charpy modificado (Tinius Olsen), conforme demonstrado na FIGURA 10.

FIGURA 10 - EQUIPAMENTO DE IMPACTRO CHARPY.



FONTE: Haselhuhn *et al.* (2014).

Chegou à conclusão de que a impressão de alumínio em metal base de aço de baixo carbono revestidos com nitreto de boro produziu a força de adesão interfacial mais fraca. O experimento realizado sobre os revestimentos de óxido de alumínio também foi eficaz, desde que fosse aplicado um aglutinante químico. E as peças de alumínio impressas em aço de baixo carbono não revestido podem ser facilmente removidas com a vantagem de não exigir a aplicação de um revestimento.

3 MATERIAIS E MÉTODOS.

A metodologia para realizar este trabalho baseou-se no princípio de que o destacamento da peça por MADA poderia ser facilitado através da aplicação de revestimentos na superfície do metal base antes da fabricação MADA. Estes revestimentos teriam como função reduzir a força necessária para realizar o destacamento, seja através de revestimentos que gere uma baixa resistência mecânica ou uma fragilização localizada na interface de forma a viabilizar o destacamento por fratura frágil, com baixa energia absorvida.

A fabricação da peça MADA foi realizada pelo processo MIG-MAG CMT com metal de adição de arame de aço cobreado ER70S-6. Estes depósitos foram realizados em um metal base de aço baixo carbono, material de baixo custo e compatível com o metal de adição utilizado. Como alternativa, avaliou-se o Ferro Fundido Cinzento como metal base, porém, neste caso, não foi utilizado nenhum revestimento.

Para o metal base de aço baixo carbono foram testados diversos tipos de revestimentos, aplicados por processos a arco elétrico, brasagem e aspensão térmica. A seguir, são apresentadas as informações relativas aos materiais aplicados, bem como o procedimento experimental utilizado.

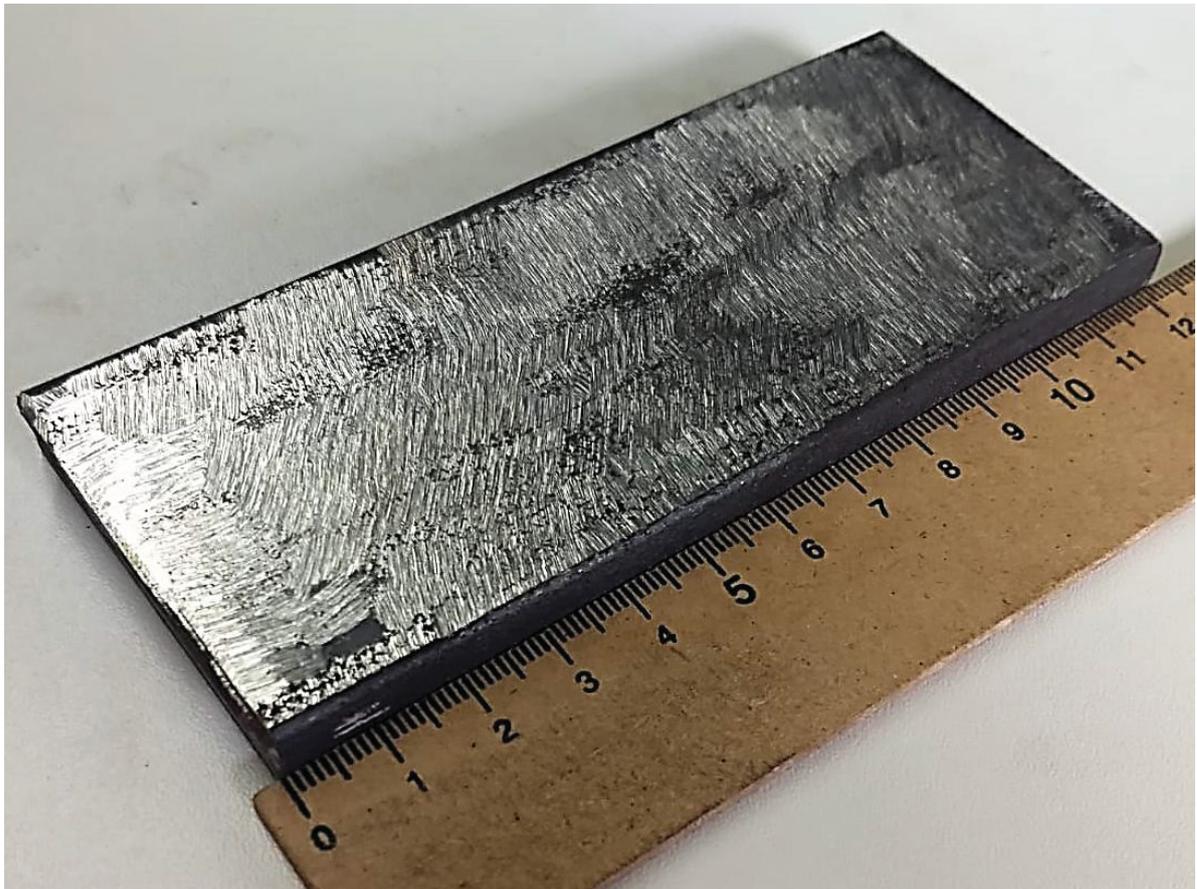
3.1 MATERIAL BASE.

O Metal base, substrato ou corpo de prova são sinônimos neste trabalho. Foram utilizados dois tipos de corpo de prova, um de aço baixo carbono e outro de ferro fundido cinzento.

3.2 CORPO DE PROVA DE AÇO BAIXO CARBONO.

Neste trabalho, utilizou-se corpos de prova de aço baixo carbono, tendo as seguintes dimensões: 120mm de comprimento, 50mm de largura e 10mm de espessura. Estas dimensões foram selecionadas para evitar possíveis empenamentos durante a realização dos depósitos por MADA. A superfície dos corpos de prova onde foram realizados os depósitos foram lixados para remover a carepa presente na superfície, utilizando-se de uma esmerilhadeira com disco flap de 4 ½ polegadas. Na FOTOGRAFIA 6, com pode ser visto o corpo de prova após esmerilhamento.

FOTOGRAFIA 6 - CORPO DE PROVA DE AÇO BAIXO CARBONO.

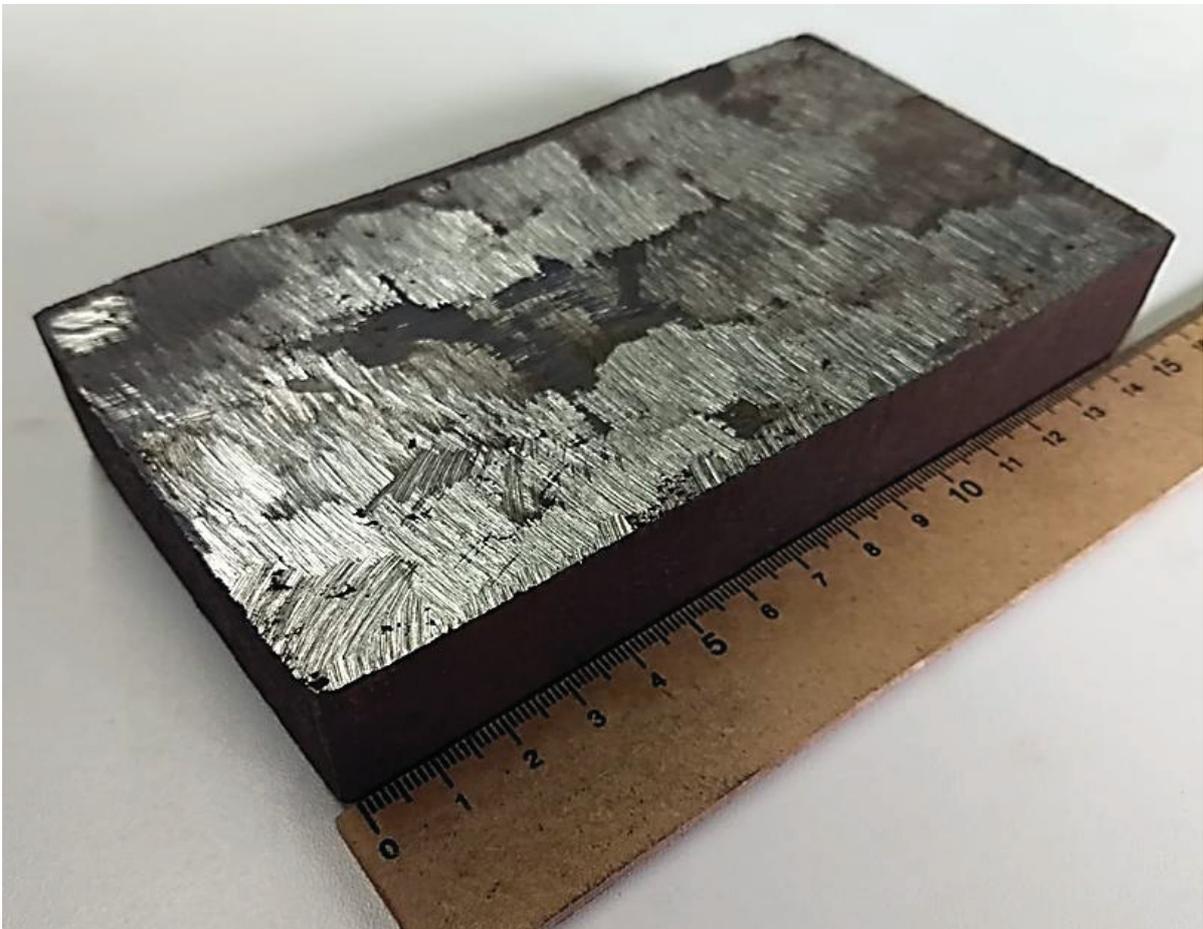


FONTE: O autor (2024).

3.3 CORPO DE PROVA DE FERRO FUNDIDO CINZENTO.

No caso do ferro fundido cinzento, foi utilizado um pequeno bloco com dimensões de 150mm de comprimento, 80mm de largura e 25mm de espessura, como mostrado na FOTOGRAFIA 7. A superfície do corpo de prova onde ocorreu a deposição MADA foi esmerilhada para remover a carepa presente, utilizando-se uma esmerilhadeira com disco flap de 4 ½ polegadas.

FOTOGRAFIA 7 - CORPO DE PROVA DE FERRO FUNDIDO.



FONTE: O autor (2024).

3.4 REVESTIMENTOS TESTADOS NOS CORPOS DE PROVA.

Foram realizados testes com diversos revestimentos aplicados na superfície dos corpos de prova, com o objetivo de facilitar o destacamento das peças fabricadas via MADA, eliminando a necessidade de corte ou usinagem. Os revestimentos testados incluíram liga de cobre/fósforo, liga de cobre/silício, alumínio puro e arame de aço cobreado. A aplicação desses revestimentos foi realizada por meio de diferentes processos, como brasagem a chama, aspersão térmica por *Flame Spray* e MIG-MAG.

Cada combinação de material de revestimento em relação ao processo de aplicação foi selecionada com o intuito de explorar possibilidades que facilitassem o destacamento. No caso da liga de cobre/fósforo, a aplicação visa formar um intermetálico devido à presença do fósforo. No alumínio puro, o objetivo é gerar uma fase frágil na interface. Para a liga de cobre/silício, a intenção é aplicar um revestimento com temperatura de fusão mais baixa, evitando assim a fusão do metal base durante a fabricação MADA. Já com o arame de aço cobreado ER70S-6, aplicado pelo processo MAG sem gás de proteção, o objetivo é formar um revestimento poroso suficiente para facilitar o destacamento.

A TABELA 1 mostra as combinações de materiais de revestimento e processos de aplicação utilizados. Apenas no caso do corpo de prova de ferro fundido cinzento não foi utilizado nenhum revestimento, visto que este material já é frágil e o destacamento poderia ocorrer pela fragilização na interface da peça MADA.

TABELA 1 - DESCRIÇÃO DOS REVESTIMENTOS REALIZADAS A PARTIR DOS PROCESSOS APLICADOS.

PROCESSO DE APLICAÇÃO	SUBPROCESSO	CORPO DE PROVA	REVESTIMENTOS
BRASAGEM	Brasagem por chama	Aço ao Carbono	Vareta Liga Cu-P FOSCOOPER
ASPERSÃO TÉRMICA	Flame spray	Aço ao Carbono	Vareta Liga Cu-P FOSCOOPER
	Flame spray	Aço ao Carbono	Arame Al PURO
SOLDAGEM A ARCO	MIG BRAZING	Aço ao Carbono	Arame Liga Cu-3%Si
	MAG CMT sem gás de proteção	Aço ao Carbono	Arame ER 70S-6

FONTE: O autor (2024).

3.5 REVESTIMENTO DE FOSCOPER APLICADOS POR BRASAGEM OXI-ACETILÊNICA.

Para a realização do revestimento de foscofer, utilizou-se como fonte de aquecimento o processo de brasagem por uma chama oxi-acetilênica levemente redutora. O equipamento utilizado foi o do laboratório de soldagem LATES, conforme visto na FOTOGRAFIA 8 a seguir.

FOTOGRAFIA 8 - PROCESSO DE BRASAGEM OXI-ACETILÊNICA.



FONTE: O autor (2024).

O revestimento de foscooper foi realizado inicialmente espalhando o fluxo sobre a área a ser brasada no corpo de prova. Em seguida, o aquecimento foi continuado até que a temperatura na superfície do corpo de prova alcançasse a temperatura de fusão do foscooper. Uma vez atingida essa temperatura, o metal de adição foi espalhado sobre a área desejada.

Utilizou-se o agente fluxante tipo super flux 3 do fabricante HARRIS que segue a Norma DIN EN 1045/97, o qual é recomendado para fluxo de brasagem para esta liga. A composição química e demais informações podem ser vista na TABELA 3 a seguir.

Tabela 2 - COMPOSIÇÃO QUÍMICA DO SUPER FLUX.

COMPONENTES	CONCENT. QUÍMICA (%)	ATUAÇÃO
Ácido bórico	30-50	550 °C a 950 °C
Bi fluoreto de potássio	33-40	
Hidróxido de potássio	6-10	

FONTE: Fabricante HARRIS 2018.

O metal de adição utilizado foi a liga Cu-P, conhecida comercialmente como Foscooper HARRIS 0 do fabricante HARRIS, tendo o formato de vareta retangular com dimensões 1.4 x 3.00 x 500 mm. Na TABELA 3 são mostradas várias características desta liga, seguindo a norma AWS A5.8/11 BCuP-2, com destaque para a composição química (91,7%Cu-8,3%P) e o intervalo de temperatura de fusão de 710°C a 812°C.

Tabela 3 - PROPRIEDADES MECÂNICAS E COMPOSIÇÃO QUÍMICA DO FOSCOOPER

COMPOSIÇÃO QUÍMICA		PROPRIEDADES MECÂNICAS				
Cu	P	Temperatura de trabalho em °C	Intervalo de fusão em °C	Resistência a tração Kgf/mm ²	Alongamento %	Dureza HB
Restante	8,3	730	710-770	25	5	180

FONTE: Fabricante HARRIS 2018.

3.6 REVESTIMENTOS DE FOSCOPER E ALUMÍNIO APLICADOS POR ASPERSÃO TÉRMICA.

Os revestimentos por aspersão térmica foram realizados utilizando-se do processo por chama oxi-acetilênica (*flame spray*) no equipamento do fabricante *Sulzer Metco*, modelo 14E-H REV.A, mostrada na FOTOGRAFIA 9. Os parâmetros utilizados na aplicação foram: Pressão do ar comprimido: 60psi; vazão do oxigênio: 50 SCFH (*Standard Cubic Feet per Hour*); vazão do acetileno: 35 SCFH. Mesmo utilizando-se da vareta de foscooper da brasagem oxi-acetilênica, tais condições permitiram obter revestimentos com boa aderência, condições essenciais para a realização da fabricação da peça MADA.

FOTOGRAFIA 9 - EQUIPAMENTO DE ASPERSÃO TÉRMICA FS.



FONTE: O autor (2024).

A superfície dos corpos de prova foi submetida a uma limpeza por jateamento abrasivo com óxido de alumínio branco 20 mesh (ao invés de lixamento, utilizado para os demais processos de revestimento) para obter grau de limpeza e rugosidade superficiais Sa3, conforme a Norma SIS 05 5900/88, para garantir o ancoramento das partículas. Uma vez jateadas, foram pré-aquecidas a uma temperatura de 150 °C para eliminação de umidade superficial e melhora da molhabilidade das partículas aspergidas.

O revestimento de foscofer utilizando foi da mesma liga do revestimento brasado, cujo dados foram apresentados no item 3.5. A vareta de foscofer foi colocada na pistola de aplicação, sendo posicionada a uma distância de 150mm do corpo de prova e foi aspergida a uma taxa de alimentação de 40g/min. O revestimento de alumínio puro utilizou-se de um arame de 3mm de diâmetro, sendo a pistola posicionada a uma distância de aplicação de 150mm do corpo de prova, a uma taxa de alimentação de 40g/min.

3.7 REVESTIMENTOS APLICADOS POR ARCO ELÉTRICO ATRAVÉS DO ROBÔ DE SOLDAGEM.

Para os revestimentos aplicados por arco elétrico, utilizou-se a célula robotizada mostrada na FOTOGRAFIA 10, composta por uma fonte de soldagem do fabricante Fronius CMT (*Cold Metal Transfer*), modelo *Trans Puls Synergic 4000CMT MV R*, acoplado ao robô de soldagem do fabricante ABB, modelo *IBR 1600 M2004*.

FOTOGRAFIA 10 - ROBÔ DE SOLDAGEM.



FONTE: O autor (2024).

Foram utilizados dois tipos de metais de adição para realizar o revestimento. Para o arame liga Cu-3%Si, utilizou-se do produto BT 513, do fabricante HARRIS. O processo de soldagem MIG-Brazing para o revestimento da liga Cu-3%Si, com o gás de proteção de argônio puro, modos de transferência por curto-circuito, a velocidade de alimentação do arame de 6m/min, com movimento de tecimento.

Na TABELA 4 é mostrada a composição química deste arame eletrodo, tendo como intervalo de fusão 950°C a 1060°C.

TABELA 4 - COMPOSIÇÃO QUÍMICA DO BT 513.

PROPRIEDADES MECÂNICAS						
Liga Harris	Intervalo de fusão em °C	Temp. de Trabalho em °C	Resist. a Tração (MPa)	Along. %	Dureza ² BB 2.5/62.5	Densid. (g/cm ³)
513	965	1035	35	40	80	8,55
	1035					
LIGA		COMPOSIÇÃO E (% PESO)				
Elemento		Cu		Sn		Si
BT 513		RESTANTE		0,6		3.0

FONTE: Fabricante HARRIS 2018.

O Revestimento com arame ER-70S6 foi realizada sem gás de proteção, com intuito de criar um revestimento poroso para quando realizar o cordão de solda, apresentasse uma região porosa para facilitar o destacamento. Utilizou o modo de transferência por curto-circuito com velocidade de alimentação do arame de 6m/min, fazendo tecimento.

O metal adição sólido de arame cobreado ER70S-6 no diâmetro de 1mm segue a norma AWS (American Welding Society) - AWS/ASME SFA5.18. Suas propriedades mecânicas e composição química podem ser visto na TABELA 5.

TABELA 5 - PROPRIEDADES MECÂNICAS E COMPOSIÇÃO QUÍMICA DO ARAME ER70S-6.

PROPRIEDADES MECÂNICAS			
LIMITES ELÁSTICOS (MPa)	RESISTÊNCIA A TRAÇÃO (MPa)	ALONGAMENTO A RUPTURA (L=5D) (%)	RESISTÊNCIA AO IMPACTO (JOULE)
420	500	22	78 à - 30°C
COMPOSIÇÃO QUÍMICA			
C	Si	Mn	
0,06 - 0,15	0,85 - 1,15	1,40 - 1,85	

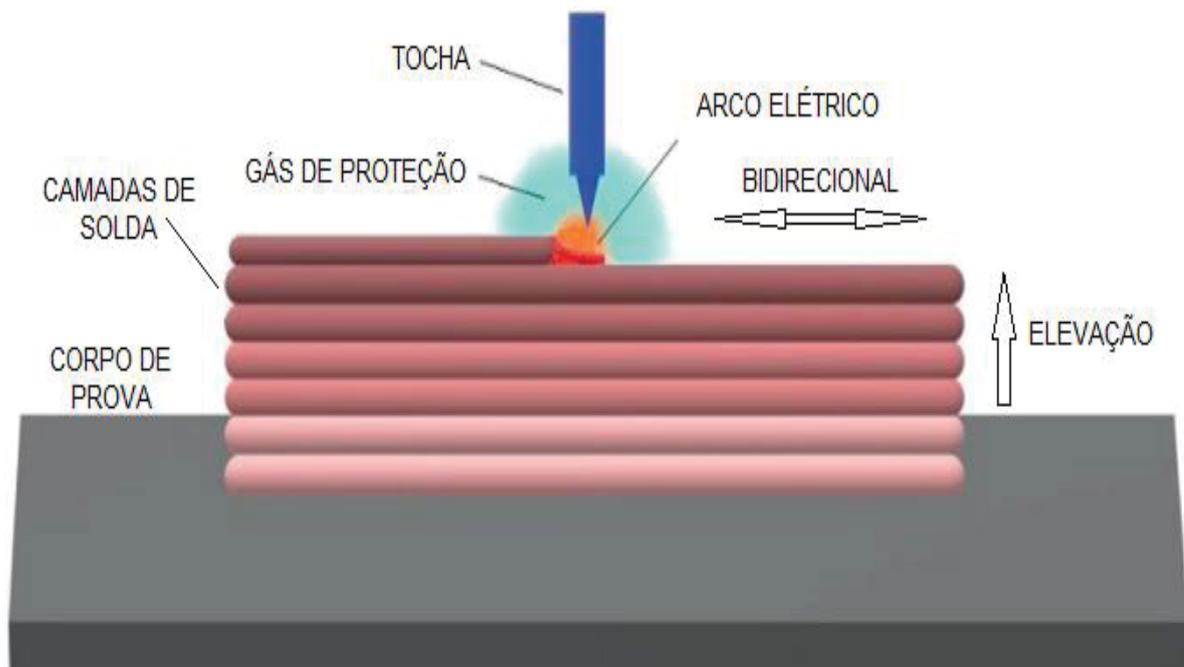
FONTE: ESAB 2023.

3.8 CONSTRUÇÃO DAS CAMADAS VIA MADA.

Sobre os corpos de prova revestidos foram realizados os depósitos por MADA, utilizou-se a mesma célula robotizada mostrada na FOTOGRAFIA 10. Optou-se pelo modo de transferência por curto-circuito CMT – (*Cold Metal transfer*) do fabricante FRONIUS, devido sua elevada estabilidade e cordões com bons acabamentos. O metal de adição utilizado foi o ER-70S-6 com bitola de 1mm, como descrito na TABELA 5, a velocidade de alimentação do arame de 6m/mim, velocidade de soldagem de 6mm/s, DBCP (Distância Bico de Contato Peça) de 15mm e gás de proteção Ar-18%CO₂.

O formato do depósito pode ser visto na FIGURA 12, sendo composta por 8 camadas sobrepostas de 100mm de comprimento depositadas na forma bidirecional, formando uma pequena parede fabricada via MADA. A cada camada havia uma elevação na vertical de 2mm no braço robótico, a fim de compensar a redução do DBCP devido o cordão depositado.

FIGURA 11 - FORMATO DAS CAMADAS MADA.



FONTE: Verman et al. (2021).

3.9 ENSAIO QUALITATIVO DE DESTACABILIDADE.

Para verificar se a peça fabricada obtida pelo processo MADA poderia ser destacada, realizou-se um ensaio qualitativo de destacabilidade. Antes de realizar o ensaio de destacabilidade aguardou-se 30 minutos após a fabricação da peça (parede) para resfriá-la até a temperatura ambiente para realizar o teste. Este teste de martelamento consistia em martelar na lateral da parede, utilizando o martelo de 250g, como mostrado na FOTOGRAFIA 11, de forma a conseguir separar a parede do corpo de prova.

FOTOGRAFIA 11 - TESTE DE MARTELAMENTO.

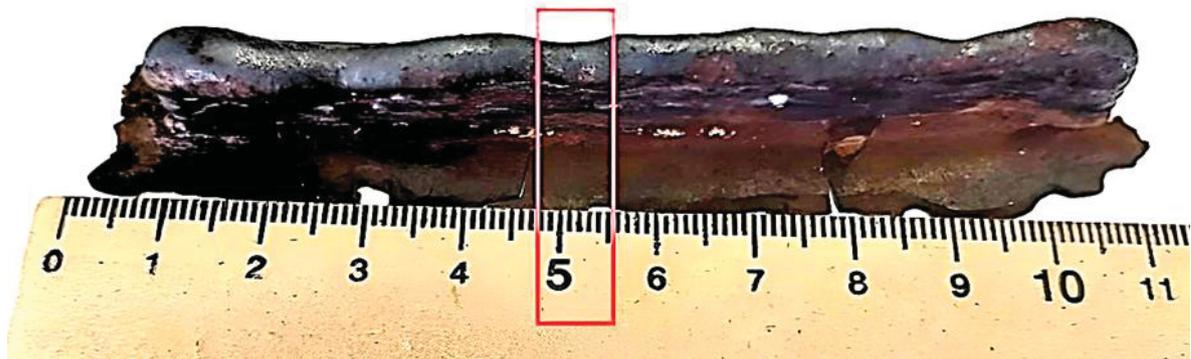


FONTE: O autor (2024).

3.10 ANÁLISES MACROGRÁFICAS E METALGRÁFICAS.

Algumas paredes MADA foram analisadas considerando aspectos macrográficos e metalográficos. Isto foi realizado devido a necessidade de esclarecer as variações observadas no teste de martelamento. Neste caso a preparação para as análises foi realizada um corte meio da seção transversal das paredes MADA já destacadas como pode ser visto na FOTOGRAFIA 12. Estas paredes foram cortadas, embutidas, lixadas, polidas e atacadas quimicamente com solução de Nital-2%. As macrografias foram realizadas no Microscópio estereoscópio Olympus SZ61, e a análise metalográfica no microscópio Olympus BX41M.

FOTOGRAFIA 12 - CORTE TRANSVERSAL NA PAREDE MADA.



FONTE: O autor (2023).

3.11 ENSAIO DE MICRODUREZA.

Algumas das paredes MADA mostraram que o destacamento ocorreu de maneira frágil no teste de martelamento lateral. Para verificar as causas deste comportamento foram realizadas medidas de microdureza Vickers, com carga de 300g no Microdurômetro Shimadzu HMV-2T.

4 RESULTADOS.

A seguir, serão apresentados os resultados obtidos considerando os revestimentos aplicados, os depósitos das paredes via MADA e as características de destacabilidade, bem como aspectos metalúrgicos relevantes.

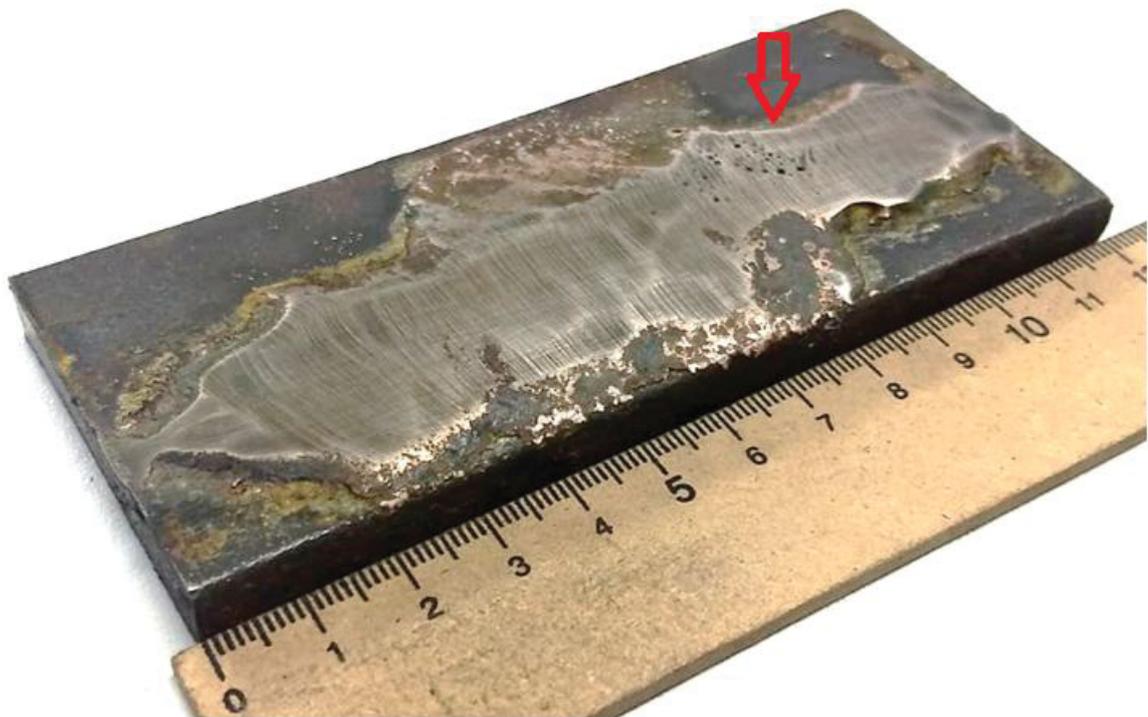
4.1 RESULTADOS DOS REVESTIMENTOS APLICADOS POR BRASAGEM, ASPERSÃO TÉRMICA E ARCO ELÉTRICO.

Os revestimentos foram aplicados com o propósito de investigar se poderiam facilitar o destacamento das paredes depositadas por meio da Manufatura Aditiva por Deposição a Arco (MADA) levando em consideração a necessidade de garantir que as peças MADA apresentem os aspectos construtivos adequados com a qualidade necessária para o produto final.

4.1.1 Revestimento de foscooper aplicado por brasagem - (91,7%Cu-8,3%P).

Na FOTOGRAFIA 13 é mostrado o corpo de prova revestido com Foscooper através da brasagem por chama oxi-acetilênica após o esmerilhamento. Este esmerilhamento foi necessário pois o revestimento obtido mostrou-se irregular na forma e espessura. Durante esse procedimento, constatou-se que o revestimento aderiu firmemente ao corpo de prova, pois não se desprende durante o esmerilhamento.

FOTOGRAFIA 13 - REVESTIMENTO DE FOSCOOPER BRASADO.



FONTE: O autor (2024).

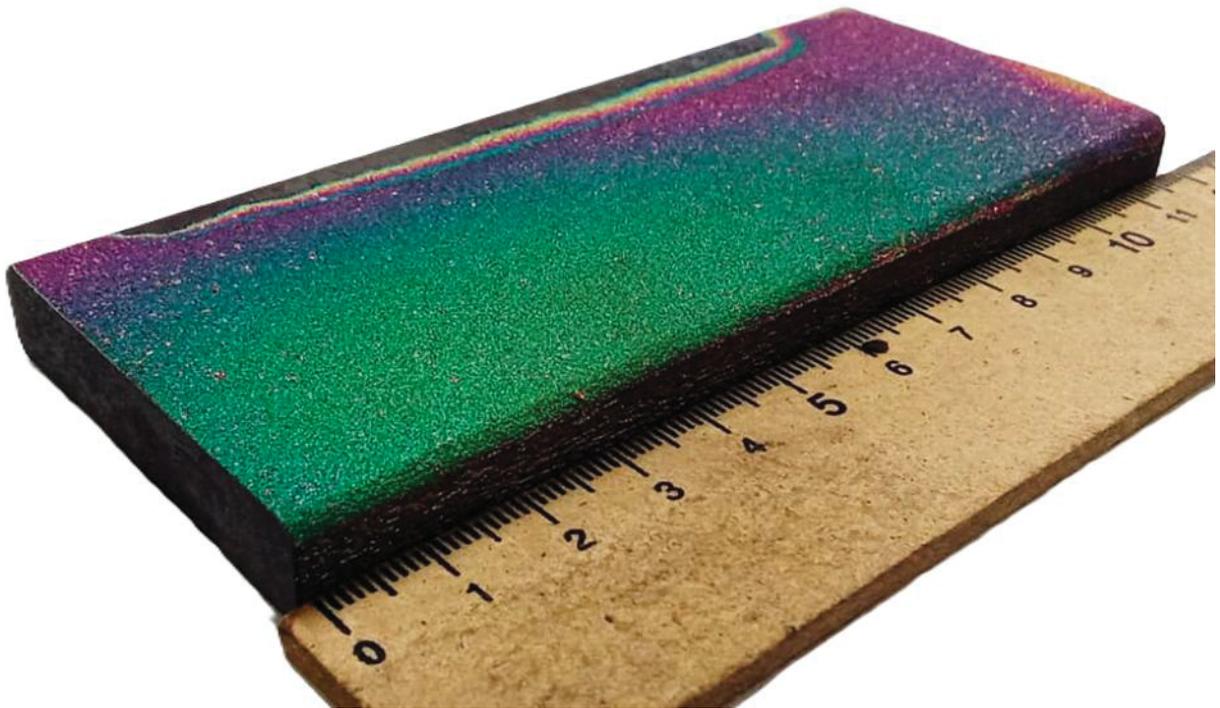
O revestimento aplicado foi de 68,25g de foscooper brasado, resultando em uma espessura de 3mm por 110mm de comprimento, sendo que, neste revestimento observou-se a presença de porosidade como indicado pela seta vermelha. Tal porosidade deve-se provavelmente a utilização de fluxo na forma de pasta que fica aprisionado no metal de adição, sendo que o processo de aplicação se faz de forma manual o que dificulta no controle da geometria e qualidade do revestimento.

4.1.2 Revestimentos aplicados por aspersão térmica.

Revestimento de Foscofer aspergido - (91,7%Cu-8,3%P).

Na FOTOGRAFIA 14, apresenta o revestimento de foscofer aspergido. O revestimento aplicado demonstrou uniformidade e de superfície áspera, o total de revestimento aplicado foi de 12,98g de foscofer aspergido, ficando com uma espessura de 0,5mm, sendo depositado o material em praticamente toda a extensão do corpo de prova com exceção da região onde a morsa foi utilizada para fixá-lo. Para avaliar a aderência, foi usada uma espátula para raspar entre o revestimento e o corpo de prova, e verificou-se que o revestimento aspergido não estava aderido, porém havia a possibilidade de fabricar a peça MADA após a aspersão.

FOTOGRAFIA 14 - REVESTIMENTO DE FOSCOFER ASPERGIDO.



FONTE: O autor (2024).

Revestimento de Alumínio aspergido.

Na FOTOGRAFIA 15 é possível verificar o revestimento de alumínio aspergido. A superfície do revestimento, após a aplicação, exibe uma textura plana e áspera. O material de alumínio aspergido foi depositado numa quantidade total de 18,6g, resultando em uma espessura aproximada de 2mm. Após a análise, verificou-se que o revestimento permaneceu aderido, sem apresentar separação.

FOTOGRAFIA 15 - REVESTIMENTO DE ALUMINIO ASPERGIDO.



FONTE: O autor (2024).

4.1.3 Revestimentos aplicados por arco elétrico.

Revestimento de MIG-Brazing. (Cu-3%Si)

Na FOTOGRAFIA 16, é possível observar o revestimento de MIG-Brazing, aplicado por arco elétrico no método de tecimento sobre o corpo de prova. A quantidade de material aplicado foi 61,25g de MIG-Brazing distribuído a uma espessura de 3mm por 110mm de comprimento. A superfície do revestimento apresentou irregularidades em sua espessura, exigindo esmerilhamento para deixar a superfície plana. Durante esse procedimento, foi constatado que o revestimento estava firmemente aderido ao corpo de prova.

FOTOGRAFIA 16 - REVESTIMENTO DE MIG-BRAZING APLICADO A ARCO ELÉTRICO.

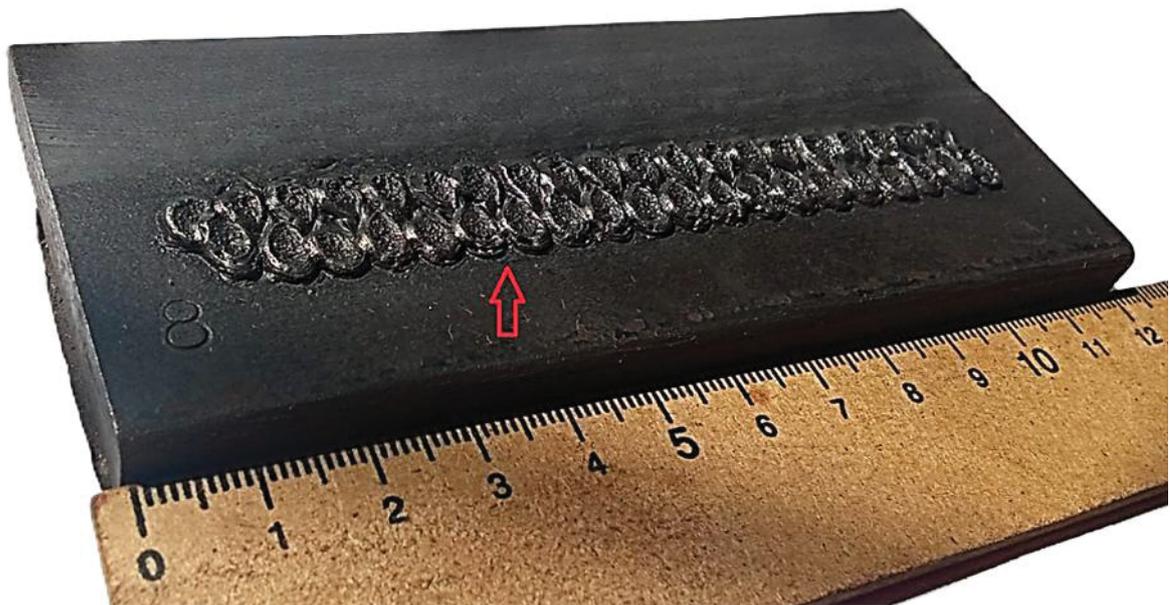


FONTE: O autor (2024).

Revestimento de arame ER70 S-6 - (Arame cobreado).

Na FOTOGRAFIA 17, pode-se observar o revestimento de arame aplicado sobre o corpo de prova por meio do método de tecimento, deixando o revestimento aplicado com 33,69g de arame de aço cobreado, distribuído a uma espessura de 5mm por 110mm de comprimento.

FOTOGRAFIA 17 - REVESTIMENTO DE ARAME ER70S-6 APLICADO A ARCO ELÉTRICO.



FONTE: O autor (2024).

Como esperado, a característica do revestimento ficou porosa, o que pode ser atribuído à ausência do uso do gás de proteção durante o processo de soldagem. Além disso, a falta de gás de proteção expôs a poça de fusão a elementos atmosféricos, como oxigênio e nitrogênio, que podem reagir com o corpo de prova e o metal de adição, comprometendo a integridade do revestimento. Essa exposição aos elementos atmosféricos pode influenciar em uma frágil fusão dos materiais, notam-se as irregularidades na superfície do revestimento, conforme indicado pela seta vermelha.

4.2 RESULTADO DAS DEPOSIÇÕES DAS PAREDES MADA SOBRE OS REVESTIMENTOS.

O resultado da fabricação da parede MADA sobre os revestimentos envolveu a avaliação de diversos aspectos, tais como: A) A verificação da regularidade geométrica da parede, considerando a uniformidade e acabamento dos cordões de solda sobrepostos (camadas); B) A aderência da 1ª camada depositada sobre o revestimento; C) A ocorrência de fusão da parede MADA sobre o corpo de prova.

4.2.1 MADA sobre revestimento de Foscofer aplicado por brasagem.

Na FOTOGRAFIA 18 é mostrado a parede MADA fabricada sobre o revestimento de foscofer, sendo a dimensão da parede obtida de 8mm de largura, 110mm de comprimento e 15mm de altura. Como característica geral a parede apresentou-se irregular, tais como; variação da seção transversal, escorrimentos, ondulações em toda última camada, sendo melhor observado na linha A, e a presença de porosidade indicada na seta B. Na mesma região da seta B é visto um dobramento na parede, esse dobramento é devido um pré-teste de martelamento.

FOTOGRAFIA 18 - MADA SOBRE REVESTIMENTO DE FOSCOFER ASPERGIDO.



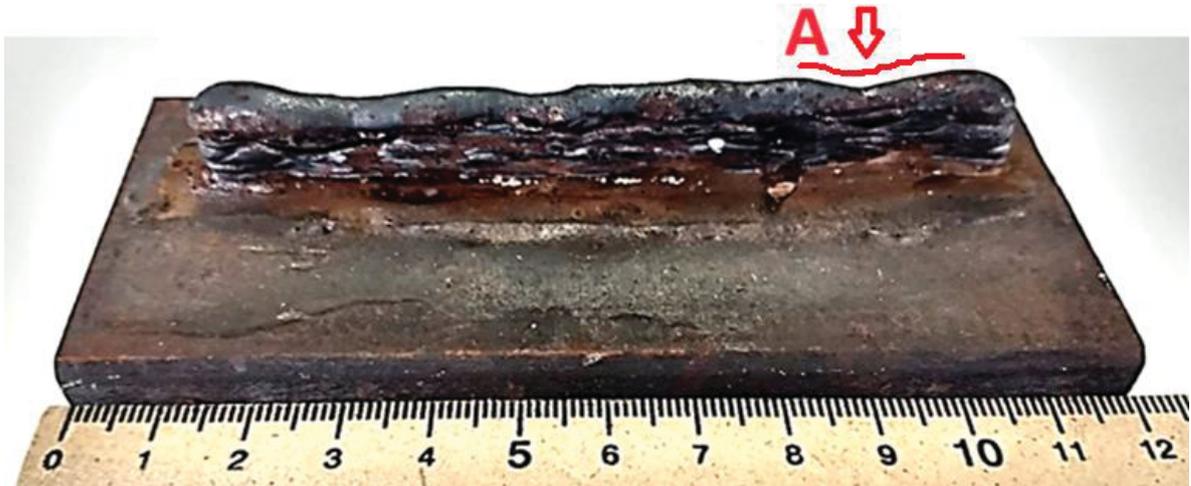
FONTE: O autor (2024).

4.2.2 MADA sobre revestimentos aplicados por aspersão térmica.

MADA sobre revestimento de Foscofer aspergido.

Na FOTOGRAFIA 19 é mostrado a parede MADA fabricada sobre o revestimento de foscofer aspergido, sendo que a parede resultou nas medidas aproximadas de 8mm de largura, 110mm de comprimento e uma altura de 15mm. No geral, a parede apresentou boas características entre camadas, como uniformidade, boa aparência e aderência com o revestimento. Porém a geometria da parede, apresentou pequenas ondulações, como pode ser visto na seta A.

FOTOGRAFIA 19 - MADA SOBRE REVESTIMENTO DE FOSCOFER ASPERGIDO.

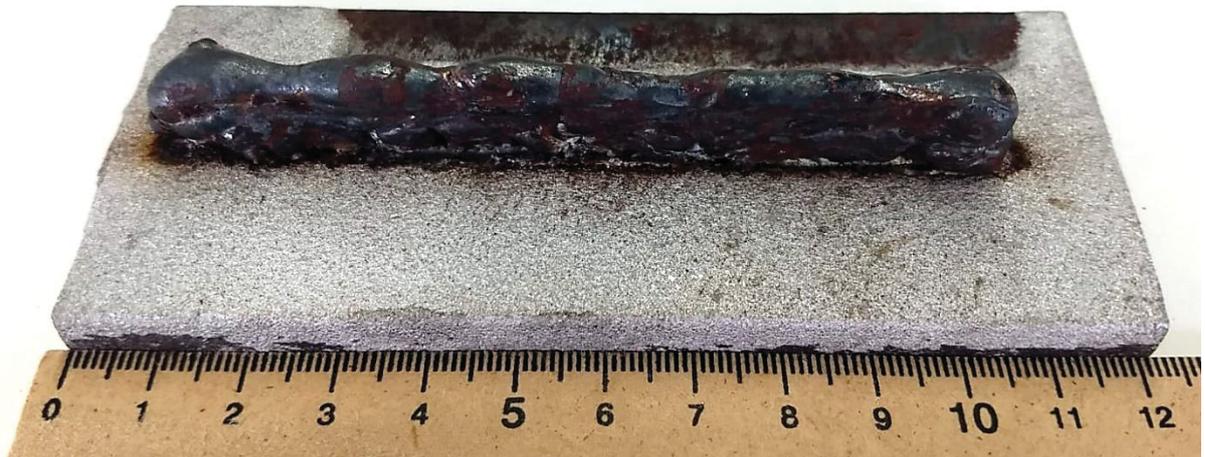


FONTE: O autor (2024).

MADA sobre revestimento de Alumínio aspergido.

Na FOTOGRAFIA 20 é mostrado a parede MADA fabricada sobre o revestimento de alumínio aspergido, a parede resultou nas medidas aproximadas de 10mm de largura, 110mm de comprimento e uma altura de 14mm. A primeira camada da parede sobre o revestimento apresentou irregularidades, tais como falta de aderência entre o revestimento e o metal de adição ER70S-6, criando a formação de acúmulos na forma de gotas grandes isoladas, ondulações e escorrimento do metal de adição. Esses defeitos resultaram em uma geometria desalinhada em relação a trajetória de deposição e uma aparência visual insatisfatória.

FOTOGRAFIA 20 - MADA SOBRE REVESTIMENTO DE ALUMÍNIO ASPERGIDO.



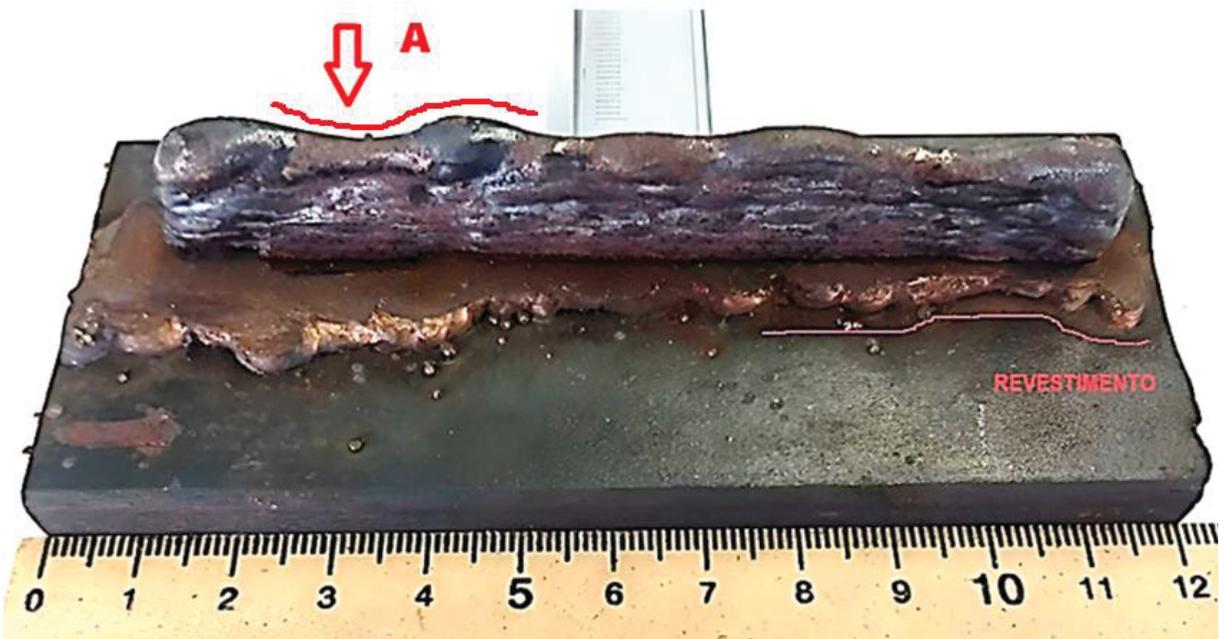
FONTE: O autor (2024).

4.2.3 MADA sobre revestimentos aplicados por arco elétrico.

MADA sobre revestimento de MIG-Brazing.

Na FOTOGRAFIA 21 é mostrado a parede MADA construída sobre o revestimento de MIG-Brazing, ao final da fabricação a parede resultou nas medidas aproximadas de 6mm de largura, 110mm de comprimento e uma altura de 15mm. A parede MADA mostrou qualidades favoráveis entre as camadas, sendo uniforme, aparência visual satisfatória e uma boa aderência entre a parede e o revestimento. Observando a fabricação da parede notou-se ondulações na sua geometria, como indicado na seta A.

FOTOGRAFIA 21 - MADA SOBRE REVESTIMENTO DE MIG-BRAZING APLICADO A ARCO ELÉTRICO.



FONTE: O autor (2024).

MADA sobre revestimento de arame ER70S-6 - (arame cobreado).

Na FOTOGRAFIA 22 é mostrado a parede MADA construída sobre o revestimento do arame ER70S-6, ao final a parede MADA resultou nas medidas aproximadas de 6mm de largura, 110mm de comprimento e uma altura de 15mm. A parede MADA mostrou-se uniforme, com geometria e alinhamento das camadas bem definida, apresentando boa deposição do material e aspectos visuais favoráveis entre camadas.

FOTOGRAFIA 22 - MADA SOBRE REVESTIMENTO DE ARAME ER70S-6 APLICADO A ARCO ELÉTRICO.

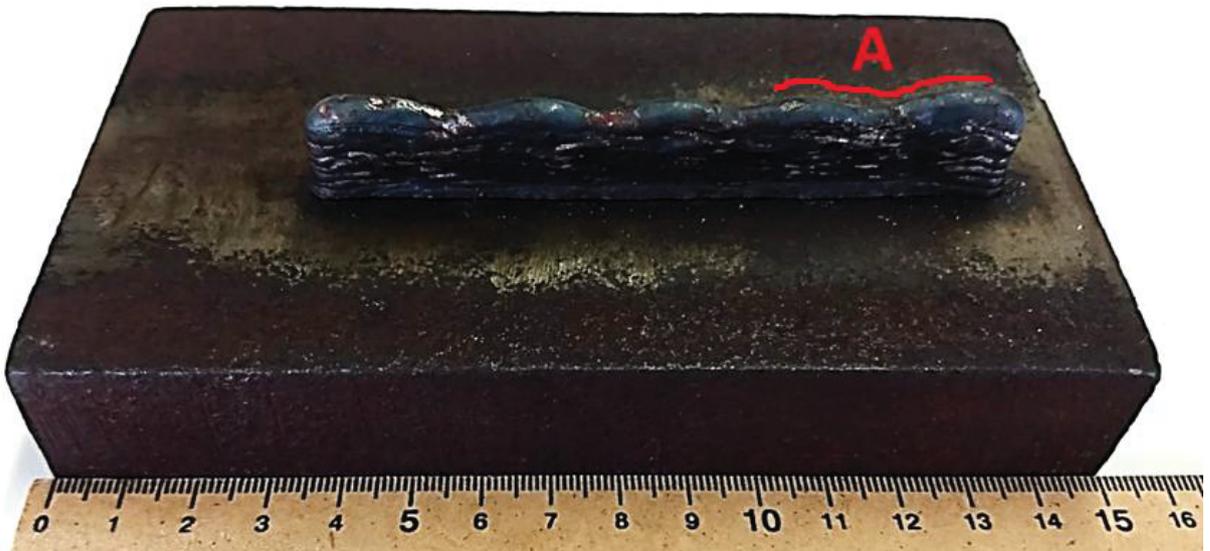


FONTE: O autor (2024).

4.2.4 MADA sobre corpo de prova de ferro fundido.

A FOTOGRAFIA 23 apresentada a parede MADA fabricada sobre o corpo de prova de ferro fundido. As camadas depositadas apresentaram medidas aproximadamente de 4mm de largura, 110mm de comprimento e 15mm de altura. A parede MADA apresentou uma boa geometria e uniformidade entre camadas, com boa deposição do metal de adição, boa aderência entre a parede ao corpo de prova, ao final a parede MADA apresentou bons aspectos visuais construtivos. Porém a superfície da parede apresentou ondulações, como vistas na linha A.

FOTOGRAFIA 23 - MADA SOBRE O CORPO DE PROVA DE FERRO FUNDIDO.



FONTE: O autor (2024).

4.3 RESULTADOS DOS DESTACAMENTOS DAS PAREDES MADA. ANÁLISES DAS MACROGRAFIAS, MICROGRAFIAS E MICRODUREZA.

4.3.1 Destacamento e análises da parede MADA sobre o revestimento de foscofer aplicado por brasagem.

Na FOTOGRAFIA 24 é mostrado o resultado do destacamento por martelamento da parede MADA depositada sobre o revestimento de Foscofer brasado. A parede MADA foi destacada do corpo de prova com apenas uma leve batida, de maneira frágil sem qualquer deformação plástica da parede.

A separação se deu de maneira irregular, sendo que nas extremidades a separação ocorreu na interface entre o revestimento e o corpo de prova (apontado pela letra A nos círculos em vermelho), e na parte central a separação se deu entre a parede MADA e o revestimento (visto pela linha B). Importante destacar que independentemente de onde a separação ocorreu, ela se deu de maneira frágil nas interfaces. Isto indica uma possível fragilização nestas interfaces.

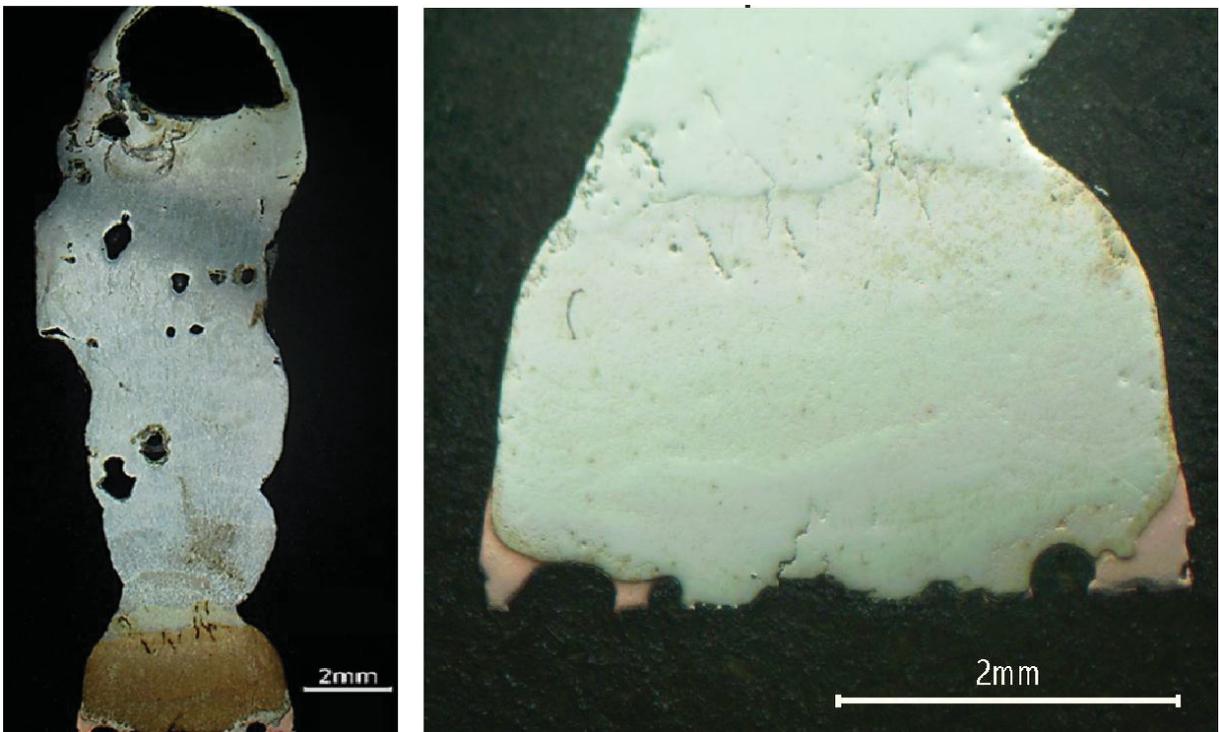
FOTOGRAFIA 24 - DESTACAMENTO DA PAREDE MADA DO REVESTIMENTO DE FOSCOFER BRASADO.



FONTE: O autor (2024).

A macrografia da seção transversal desta parede, pode ser visto na FOTOGRAFIA 25. Observa-se que o perfil da parede é bastante irregular, e com porosidade acentuada no material depositado. Um provável causa destes poros seria fluxo mineral, que pode ficar aprisionado no revestimento. Ao fabricar a parede MADA houve fusão do Foscooper e parte deste fluxo provavelmente foi incorporado a peça gerando poros. A presença do grande poro observado, também foi vista na FOTOGRAFIA 18 (seta B), confirmando que a porosidade infelizmente é uma das características neste processo.

FOTOGRAFIA 25 - MACROGRAFIA DA SECÇÃO TRANSVERSAL DA PAREDE MADA DO REVESTIMENTO DE FOSCOOPER BRASADO.

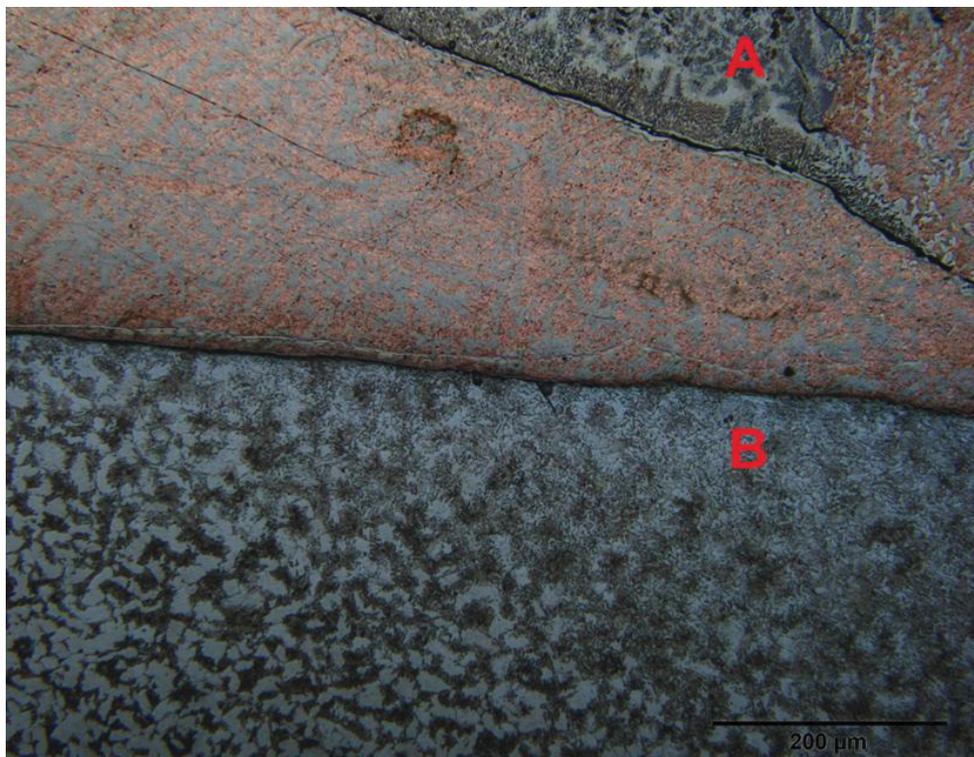


FONTE: O autor (2024).

Em relação a região de separação, verifica-se que a fratura ocorreu na interface entre o revestimento e primeira camada da parede MADA. Nesta interface observa-se a presença de porosidade e uma pequena quantidade do revestimento, de coloração rosada nas extremidades da interface. Observa-se ainda que a primeira camada possui uma coloração diferente das demais, provavelmente devido a diluição do revestimento.

Na FOTOGRAFIA 26 é mostrada a metalografia das interfaces: A) entre o revestimento e a parede MADA, B) entre o revestimento de Foscooper brasado e o corpo de prova; é possível observar que o corpo de prova sofreu um aquecimento significativo, uma vez que os grãos abaixo do revestimento estão refinados. Este aquecimento seria compatível com uma austenitização a baixa temperatura, o que é razoável considerando que a liga Foscooper utilizada funde completamente acima de 812°C. Esta análise será utilizada para comparar os revestimentos de Foscooper brasado e aspergidos, em discussão a ser apresentada adiante.

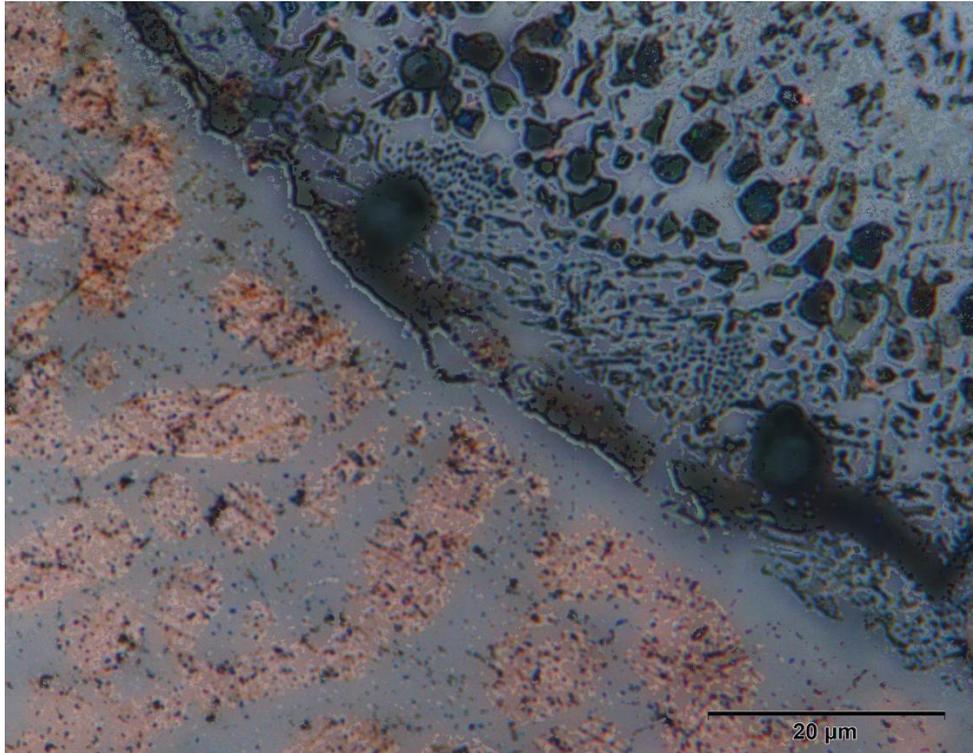
FOTOGRAFIA 26 - METALOGRAFIA DAS INTERFACES DA PAREDE MADA X REVESTIMENTO X CORPO DE PROVA.



FONTE: O autor (2024).

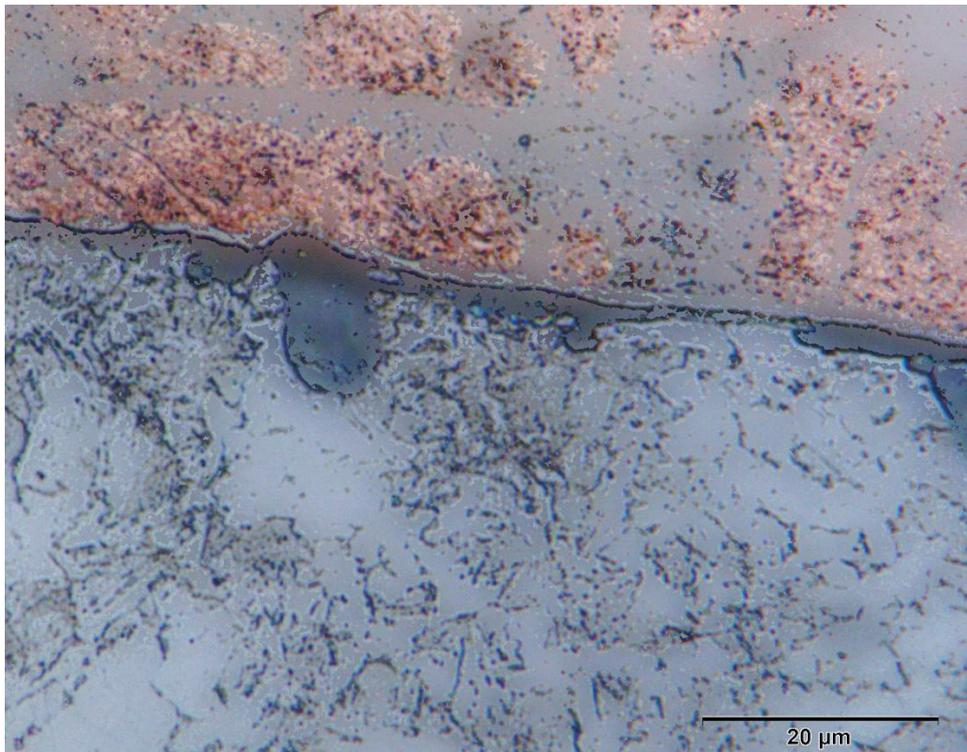
A FOTOGRAFIA 27 e 28 correspondem à ampliação da Fotografia 26, sendo a 27 focando na interface entre a parede MADA e o revestimento, e a 28 na interface entre o revestimento e o corpo de prova. Em ambas as interfaces, é possível observar a presença de uma fase contínua com coloração acinzentada. Esta fase contínua seria o intermetálico Fe-P, que é frágil, o que explicaria o fato para separação ter ocorrido nestas 2 interfaces.

FOTOGRAFIA 27 - INTERFACE ENTRE A PAREDE MADA E O REVESTIMENTO.



FONTE: O autor (2024).

FOTOGRAFIA 28 - INTERFACE ENTRE O REVESTIMENTO E O CORPO DE PROVA.



FONTE: O autor (2024).

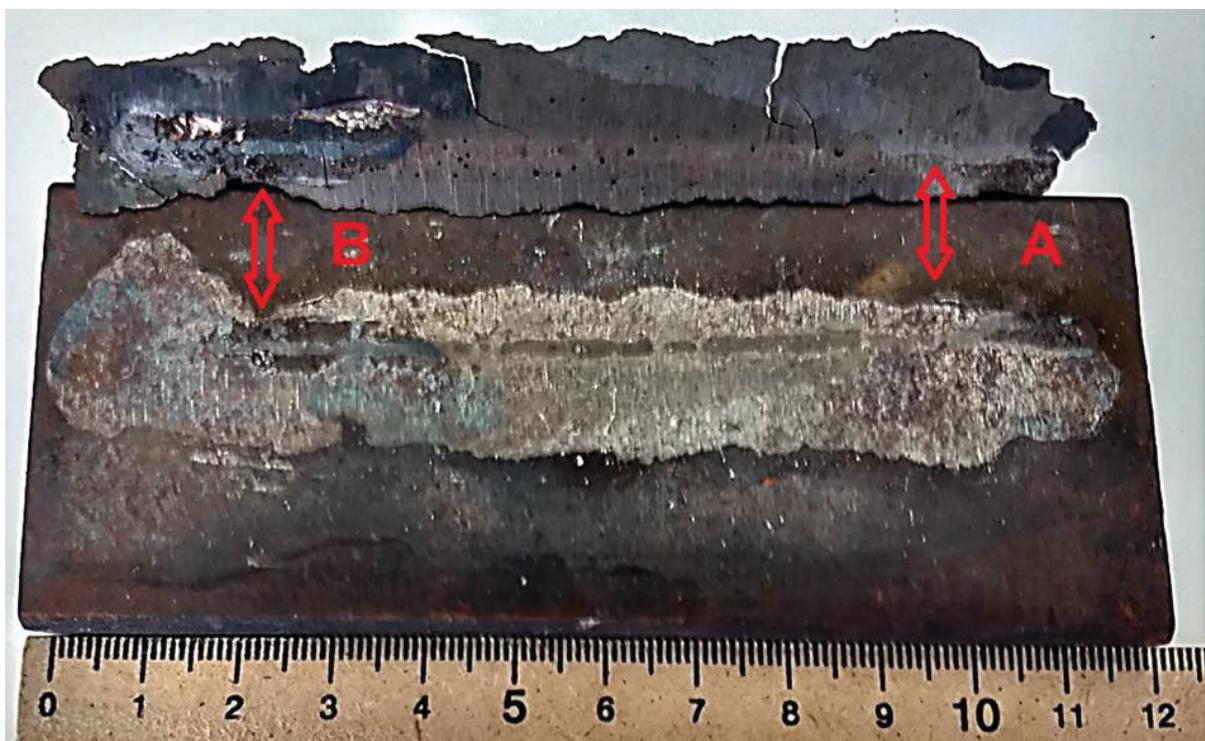
4.3.2 Destacamentos e análises das paredes MADA sobre os revestimentos aplicados por aspersão térmica.

Destacamento e análise da parede MADA sobre o revestimento de Fosco-per aspergido.

Na FOTOGRAFIA 29 é mostrado o resultado do destacamento por martelamento da parede MADA depositada sobre o revestimento de Fosco-per aspergido. A parede MADA foi destacada do corpo de prova com apenas uma leve batida, sendo que o revestimento aspergido ficou preso à parede MADA, podendo ser visto na seta A. O destacamento se deu de maneira frágil.

A separação entre a parede MADA e o corpo de prova ocorreu na interface entre o Fosco-per aspergido e o corpo de prova. Na região apontada pela letra B, foi observado a ocorrência de um pequeno arrancamento do material base, o que não comprometeu a qualidade da parede impressa e a própria destacabilidade observada.

FOTOGRAFIA 29 - DESTACAMENTO DA PAREDE MADA DO REVESTIMENTO DE FOSCO-PER ASPERGIDO.

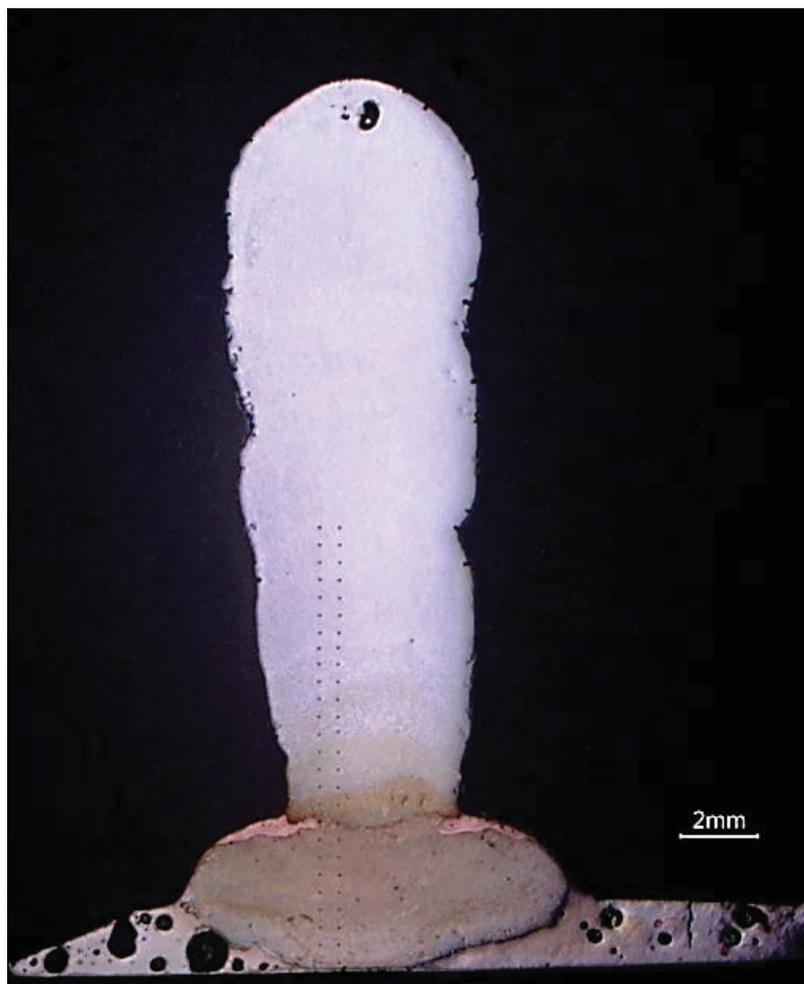


FONTE: O autor (2024).

Na FOTOGRAFIA 30 é visto a macrografia da seção transversal desta parede MADA após o teste de destacamento. O destacamento ocorreu de maneira frágil na interface entre o revestimento e o corpo de prova, indicando uma possível fragilização nesta interface, observado nesta mesma fotografia é visto o revestimento totalmente poroso. Nota-se também que a primeira camada da parede MADA dissolveu o revestimento, e as demais mostraram-se relativamente regulares, sendo somente na última camada a presença de um poro, sem causa conhecida.

Este comportamento difere completamente do caso anterior (Foscoper brasado), que apresentou poros em todas as camadas, mostrando que o revestimento de Foscoper aspergido acarreta uma parede de melhor qualidade em relação a brasada, tal fato reforça a hipótese de que esta porosidade seria decorrente do uso de fluxo utilizado na brasagem.

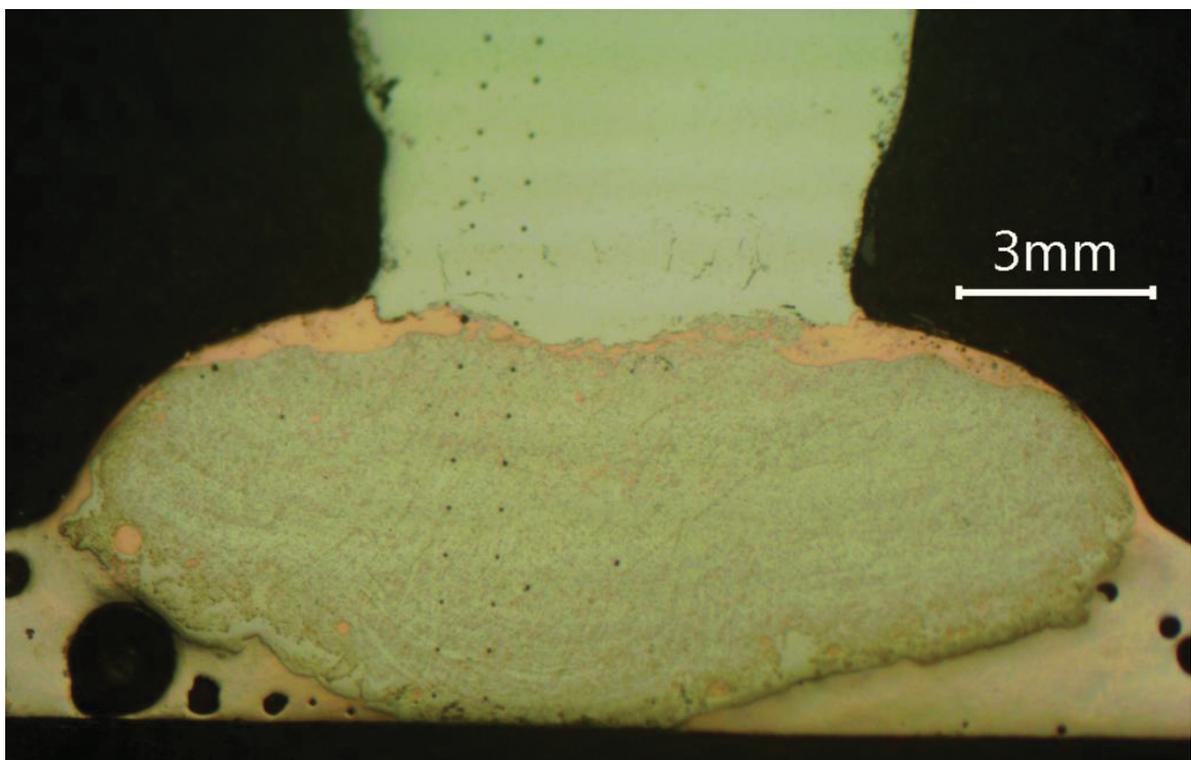
FOTOGRAFIA 30 - MACROGRAFIA DA SECÇÃO TRANSVERSAL DA PAREDE MADA DO REVESTIMENTO DE FOSCOPER ASPERGIDO.



FONTE: O autor (2024).

A primeira camada é mostrada de forma ampliada na FOTOGRAFIA 31. Nota-se que esta camada é significativamente maior que as demais, o que pode estar relacionado com a dissolução e incorporação do revestimento (diluição). Além disso, observa-se que a camada está totalmente envolvida por uma fase de coloração rosada, que aparentemente seria do revestimento. Tal característica é estranha, sendo que a provável explicação para tal fato seria uma solubilidade parcial do revestimento no metal depositado na primeira camada.

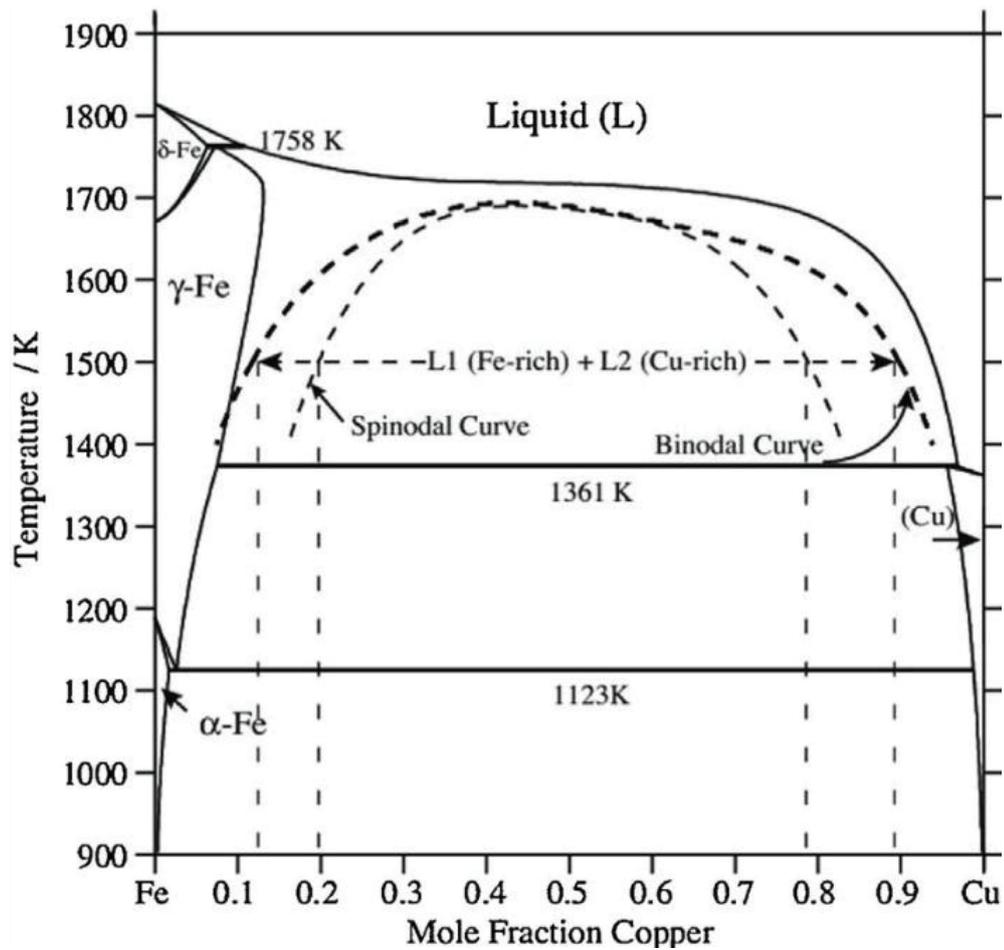
FOTOGRAFIA 31 - METALOGRAFIA DA 1ª CAMADA ENVOLVIDA PELO REVESTIMENTO.



FONTE: O autor (2024).

Lembrando que a liga Foscofer é composta basicamente de 91,7%Cu-8,3%P, é esperado que o cobre desta liga não se solubilize na parede, que é basicamente um aço. Isto pode ser visto no diagrama de fases Fe-Cu, mostrado na FIGURA 13, onde se verifica que o cobre tem baixa solubilidade no ferro.

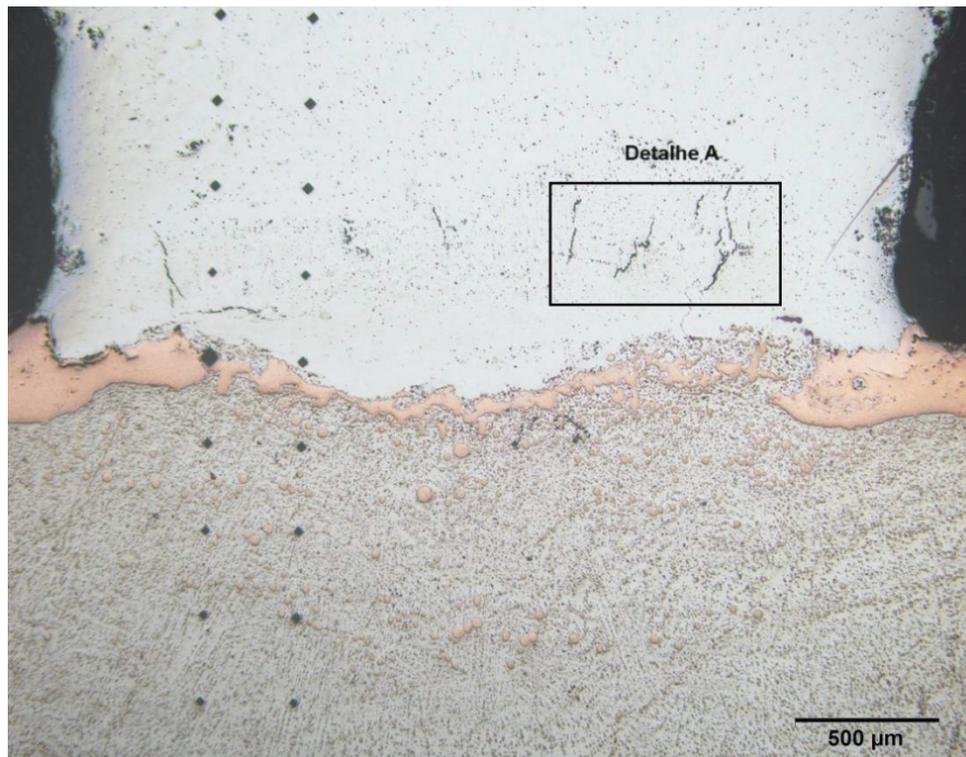
FIGURA 12 - DIAGRAMA DE FASE Fe-Cu.



FONTE: Tianbiao Yu (2020).

A confirmação de que o cobre não se solubilizou pode ser observada na FOTOGRAFIA 32, onde uma faixa rosada é evidente, revelando uma grande quantidade de glóbulos de uma fase rosada (provavelmente rica em cobre) dentro da primeira camada.

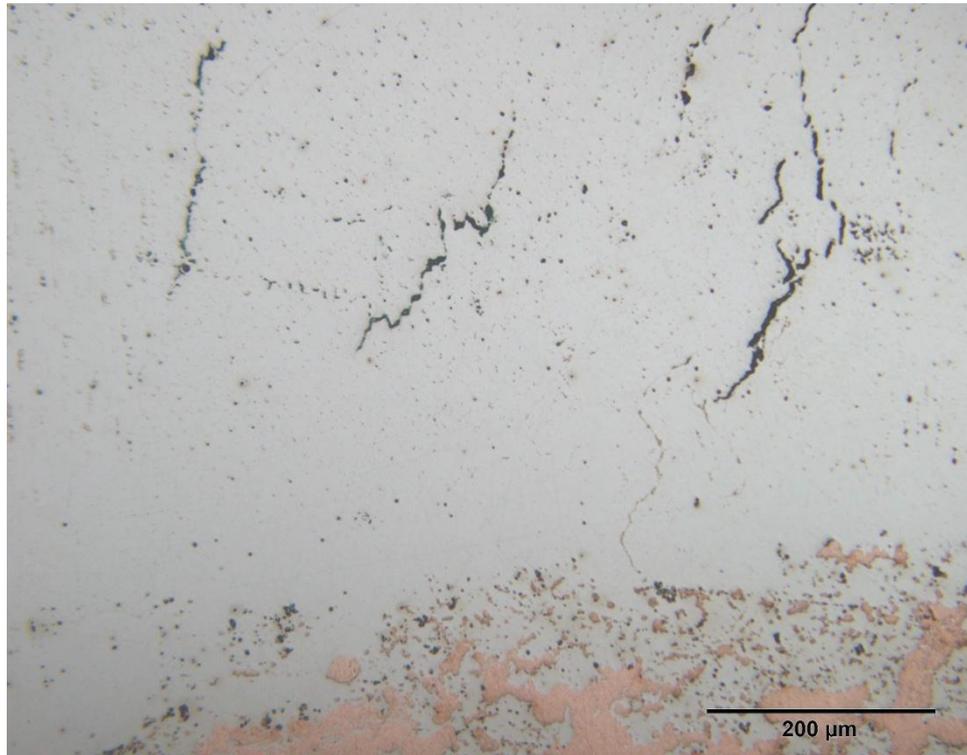
FOTOGRAFIA 32 - METALOGRAFIA AMPLIADA DA 1ª CAMADA ENVOLVIDA PELO REVESTIMENTO.



FONTE: O autor (2024).

Na FOTOGRAFIA 33 abaixo é mostrado o detalhe A da FOTOGRAFIA 32, onde são observadas trincas na parte inferior da 2ª camada, fotografadas sem ataque químico. Na FOTOGRAFIA 34 é mostrado uma destas trincas de forma ampliada após o ataque químico com solução de Nital 3%. Nota-se a trinca ocorre nitidamente através dos contornos dos grãos, onde também se observa a presença de uma fase rosada, provavelmente cobre segregado durante a solidificação. Tais trincas são tipicamente trincas a quente, e ocorrem devido a diluição da 1ª camada (que contém bastante cobre) e na 2ª camada, que segrega o cobre durante a solidificação devido à baixa solubilidade do cobre no aço conforme comentado anteriormente.

FOTOGRAFIA 33 - METALOGRAFIA DO DETALHE A DAS TRINCAS DA 2ª CAMADA.



FONTE: O autor (2024).

FOTOGRAFIA 34 - MICROGRAFIA AMPLIADA DAS TRINCAS NA 2ª CAMADA.

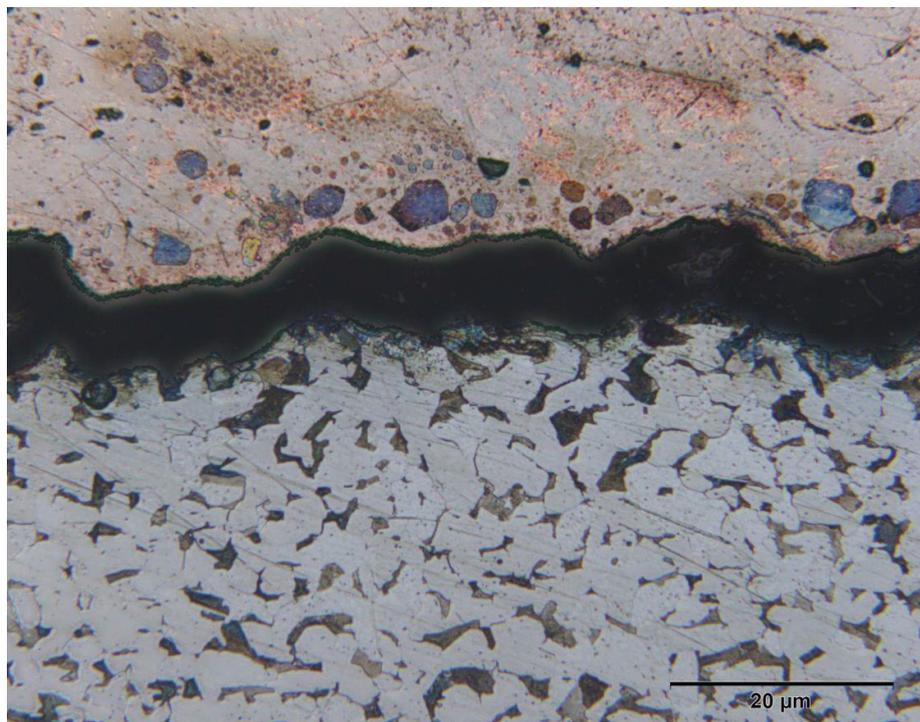


FONTE: O autor (2024).

Para verificar o porquê destacou entre o revestimento e corpo de prova que estaria ocorrendo nesta interface, foi realizada uma metalografia do corpo de prova, que é mostrada na FOTOGRAFIA 35. A camada revestida já está separada do corpo de prova, mostrando que esta interface não possui uma elevada resistência mecânica. O revestimento possui um perfil negativo em relação a superfície do corpo de prova, mostrando que este revestimento aspergido está devidamente depositado, porém sem ligação metalúrgica.

Este fato pode ser confirmado com a microestrutura do corpo de prova, onde se observa que não há qualquer modificação nas características metalúrgicas na superfície de contato com o revestimento, indicando um baixo aquecimento ocasionado pela aspersion térmica. Nesta situação, a formação do intermetálico Fe-P não é favorecida, e realmente não foi observada, conforme mostrado na ampliação desta região.

FOTOGRAFIA 35 - MICROGRAFIA DA INTERFACE DO REVESTIMENTO AO CORPO DE PROVA.

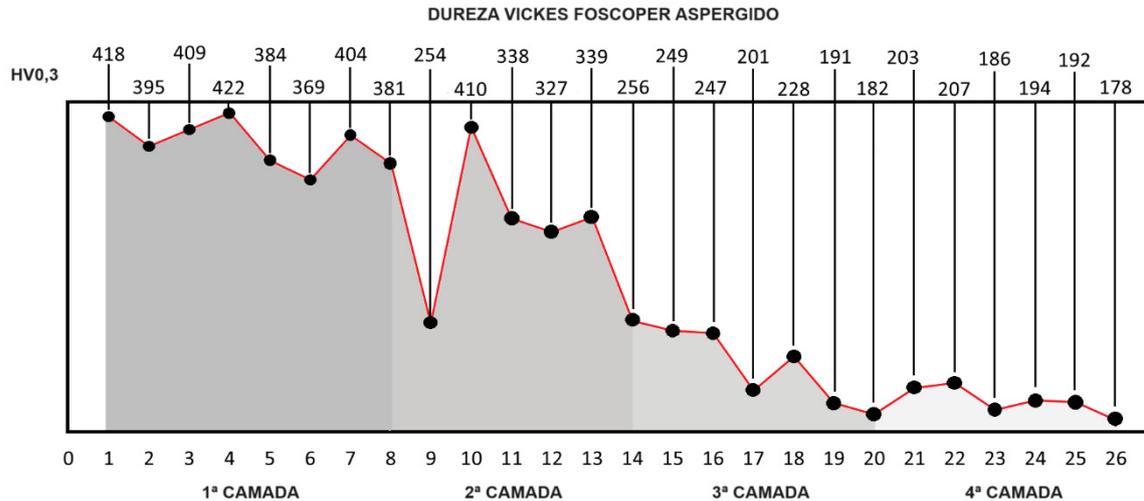


FONTE: O autor (2024).

Considerando tais características, conclui-se que o revestimento depositado por aspersão térmica não possui ligação metalúrgica com o corpo de prova, porém possui pouca aderência sobre este. O destacamento observado ocorreu justamente nesta interface simplesmente pela separação entre o revestimento e o corpo de prova devido à ausência de uma ligação metalúrgica.

Na FIGURA 13 é mostrado no gráfico a variação de microdureza Vickers entre a 1ª até a 4ª camada, sendo o valor de dureza indicado a média de 2 medidas. As maiores durezas ocorreram na 1ª camada, com valores na faixa de 370 a 420 HV0,3, caindo gradativamente para as demais camadas, até atingir 178 HV0,3 na 4ª camada. A maior dureza da 1ª camada seria explicada pelo endurecimento por solução sólida do cobre e do fósforo, devido a diluição do revestimento. Nota-se ainda que a 2ª camada também apresenta elevada dureza, que seria decorrente da diluição da 1ª camada contendo cobre e fósforo em solução sólida ou segregados.

FIGURA 13 - GRÁFICO DA MICRODUREZA DA PAREDE MADA SOBRE FOSCOPER ASPERGIDO.



FONTE: O autor (2024).

Destacamento e análise da parede MADA sobre o revestimento de Alumínio aspergido.

Na FOTOGRAFIA 36 é mostrado o resultado do destacamento por martelamento da parede MADA depositada sobre o revestimento de Alumínio aspergido. O destacamento se deu de maneira muito fácil, tendo ocorrido com um leve martelamento. Na análise visual, nota-se a presença de várias falhas nesta interface, conforme pode ser visto na fotografia. Estas falhas afetaram a deposição das camadas subsequentes, resultando numa parede MADA de péssimo acabamento.

FOTOGRAFIA 36 - DESTACAMENTO DA PAREDE MADA DO REVESTIMENTO DE ALUMÍNIO ASPERGIDO.



FONTE: O autor (2024).

A parede MADA ampliada na FOTOGRAFIA 37 mostram espaçamentos entre as formações das gotas na 1ª camada, e camadas subseqüente irregulares, denotando uma fabricação deficiente, comprometendo a integridade estrutural e, por conseguinte, a confiabilidade da parede. Devido a estas características, as demais análises não foram efetuadas.

FOTOGRAFIA 37 - ESTRUTURA DA PAREDE MADA DO REVESTIMENTO DE ALUMÍNIO ASPERGIDO.



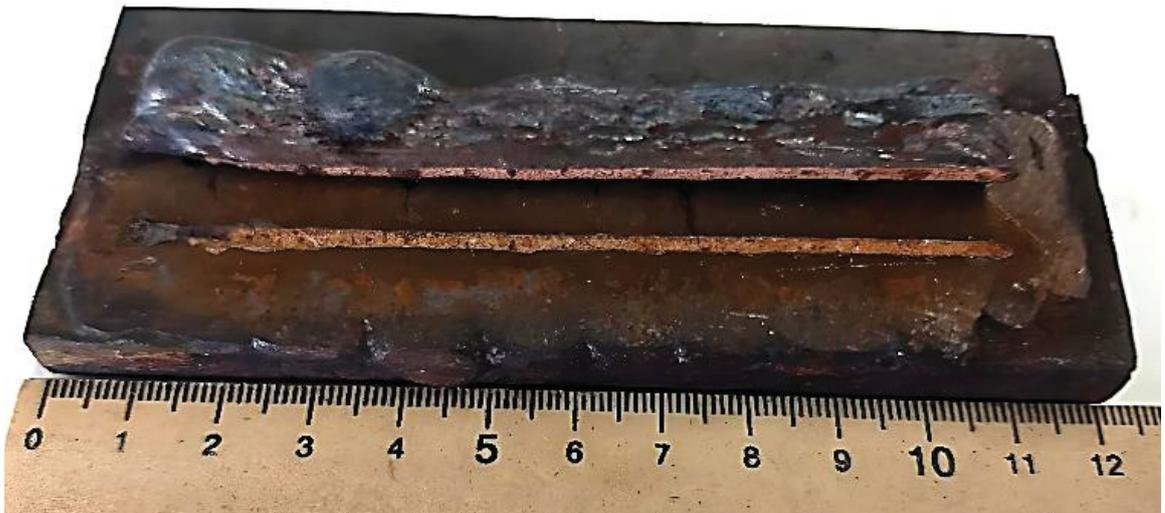
FONTE: O autor (2024).

4.3.3 Destacamento e análises das paredes MADA sobre os revestimentos aplicados a arco elétrico.

Destacamento e análise da parede MADA sobre o revestimento de MIG-Brazing.

A FOTOGRAFIA 38 é mostrado o destacamento da parede MADA do revestimento de MIG-Brazing. No teste de martelamento a parede MADA destacou-se com facilidade do revestimento, sendo que a separação ocorreu logo abaixo da 1ª camada depositada, praticamente na interface com o revestimento. Observa-se que o revestimento em si ficou aderido ao corpo de prova, destacando somente a peça MADA.

FOTOGRAFIA 38 – DESTACAMENTO DA PAREDE MADA DO REVESTIMENTO DE MIG-BRAZING.



FONTE: O autor (2024).

Na FOTOGRAFIA 39 é mostrado o perfil da parede MADA, Nesta fotografia é visto que a secção transversal do perfil da parede MADA de MIG-Brazing mostrou certa regularidade, entretanto observou-se que a 1ª camada é a mais estreita de todas, tendo um formato trapezoidal, com uma largura de aproximadamente 2mm junto a interface onde ocorreu o destacamento. Tal característica provavelmente facilitou o destacamento, por ser bem menor em comparação com a 1ª camada das paredes impressas sobre os revestimentos de Fosco per brasado ou aspergido.

FOTOGRAFIA 39 - MACROGRAFIA DA PAREDE MADA SOBRE O REVESTIMENTO DE MIG - BRAZING.



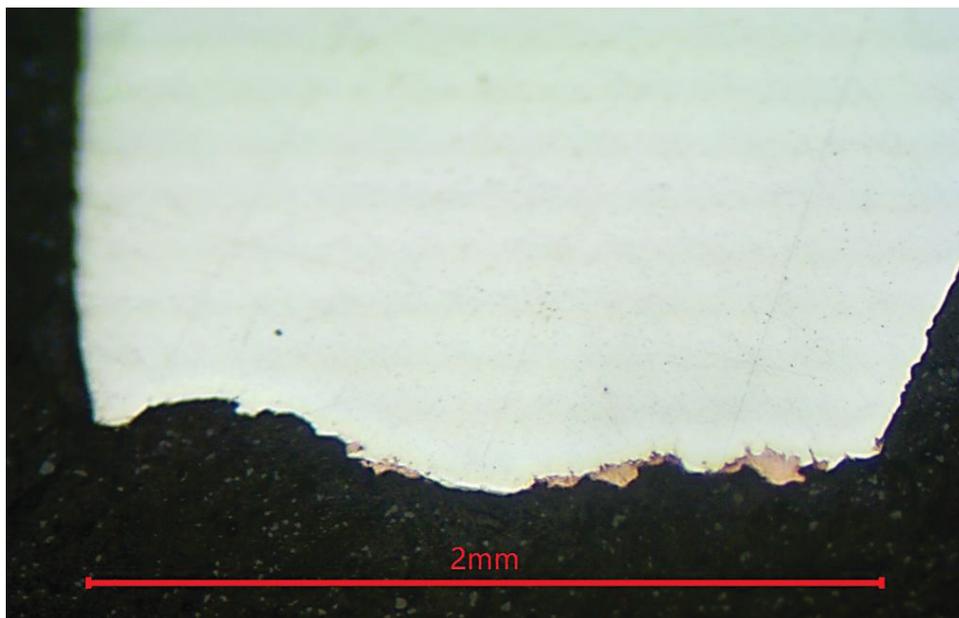
FONTE: O autor (2024).

Ampliando a região do destacamento sem o ataque químico, é mostrado na FOTOGRAFIA 40 o perfil trapezoidal da primeira camada. Observa-se que a separação ocorreu exatamente na interface, sendo que uma mínima quantidade do revestimento aderiu à base da parede MADA. Tal característica é interessante ressaltar que praticamente a camada é preservada do revestimento e o corpo de prova não sofreu qualquer mudança de forma.

Considerando que o revestimento neste caso é uma liga composta de 97%Cu e 3%Si, seria esperado que, caso houvesse diluição significativa deste revestimento na 1ª camada, o cobre poderia estar presente nesta camada na forma livre devido a sua baixa solubilidade. Isto não ocorreu, logo se conclui que houve uma pequena fusão da primeira camada sobre o revestimento. Outra característica que vai na mesma direção é a ausência de trincas nesta 1ª camada, que deveria ocorrer caso houvesse cobre diluído.

Neste caso o destacamento não envolveu nenhuma fase frágil ou separação devido à baixa aderência do revestimento. Ela ocorreu pela ruptura do revestimento, que tem menor resistência mecânica que o material da parede, facilitado pela menor espessura na base da 1ª camada.

FOTOGRAFIA 40 - MICROGRAFIA DO PERFIL TRAPEZOIDAL DA 1ª CAMADA DA PAREDE MADA.

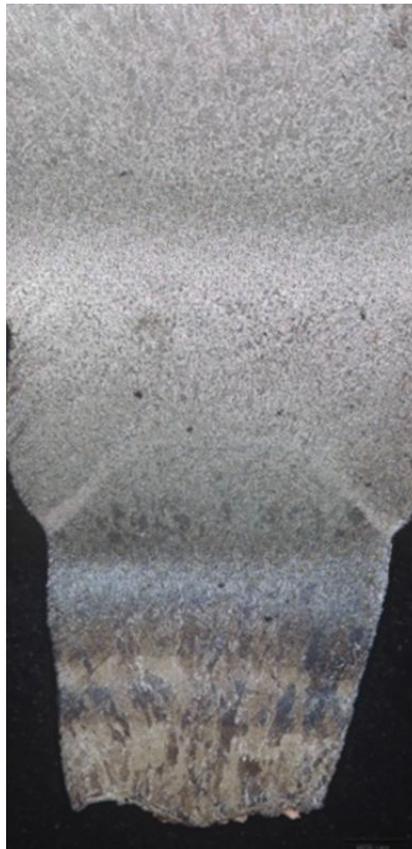


FONTE: O autor (2024).

Analisando-se a microestrutura das 4 primeiras camadas, que pode ser vista na FOTOGRAFIA 41, nota-se que a 1ª camada aparece mais escurecida pelo ataque químico em relação às demais camadas. Neste caso, não houve diluição do revestimento do MIG-Brazing, seria esperado que as microestruturas das três camadas fossem semelhantes, o que não ocorreu.

A diferença de coloração da 1ª camada poderia ser atribuída a uma microestrutura diferenciada em relação às demais, sendo o mais provável que a sua velocidade de resfriamento seja maior em relação as demais camadas. Isto seria aceitável e ajudaria a explicar o formato desta 1ª camada, pois não foi capaz de diluir o revestimento devido a velocidade de resfriamento do material depositado.

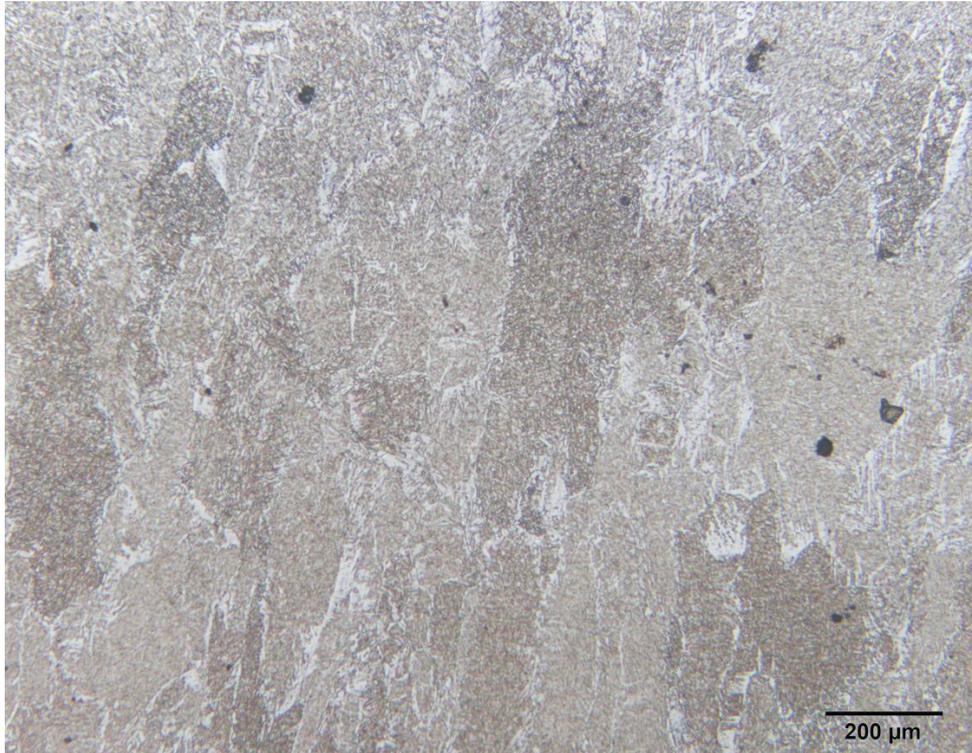
FOTOGRAFIA 41 - MICROGRAFIA DO FORMATO DA PAREDE MADA DE MIG-BRAZING.



FONTE: O autor (2024).

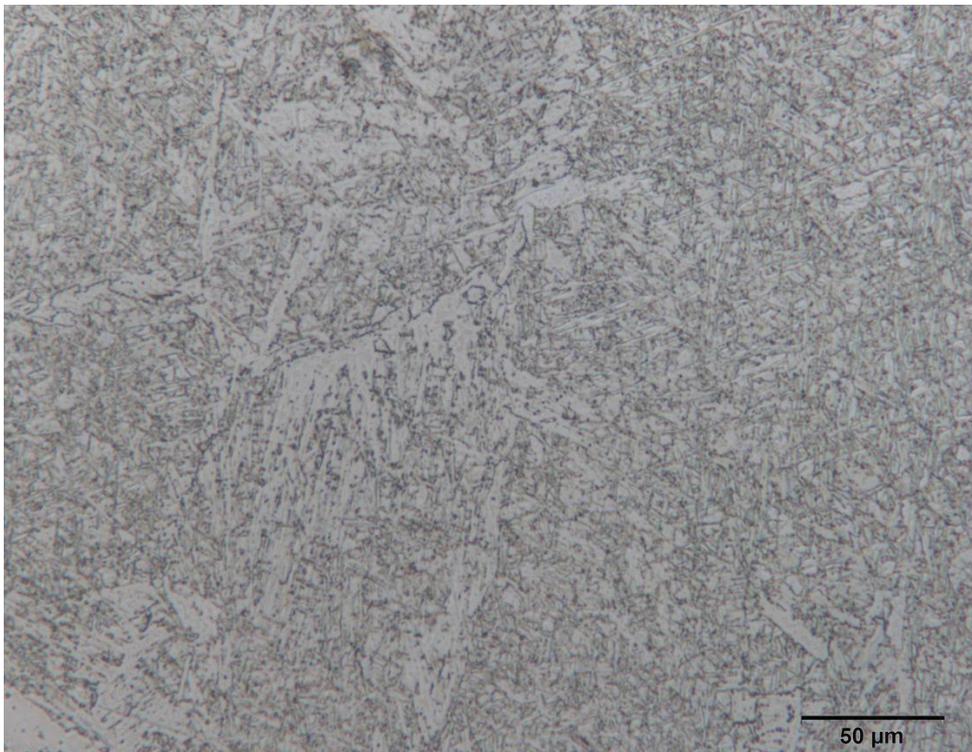
Nas FOTOGRAFIAS 42 e 44 são mostradas metalografias ampliadas da 1ª e 4ª camadas. Nota-se que a microestrutura das 2 camadas é composta basicamente de ferrita, porém no caso da 1ª camada a ferrita é muito mais refinada em relação a 4ª camada, mostrando que sua taxa de resfriamento pós-solidificação foi muito maior.

FOTOGRAFIA 42 - MICROGRAFIA DA 1ª CAMADA DA PAREDE MADA.



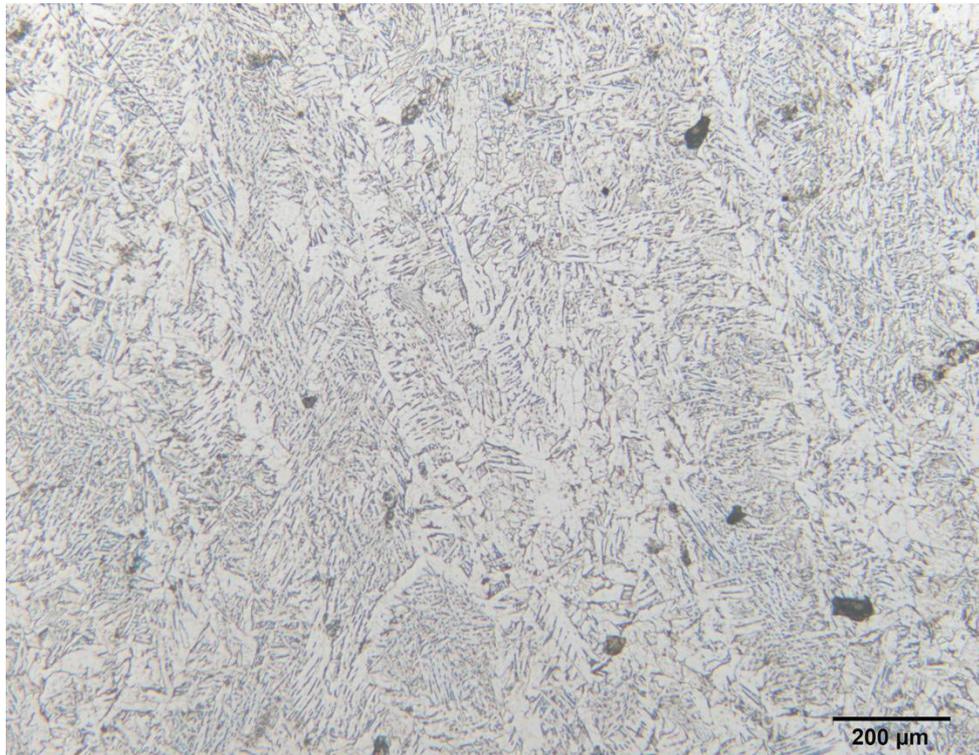
FONTE: O autor (2024).

FOTOGRAFIA 43 - MICROGRAFIA AMPLIADA DA 1ª CAMADA DA PAREDE MADA.



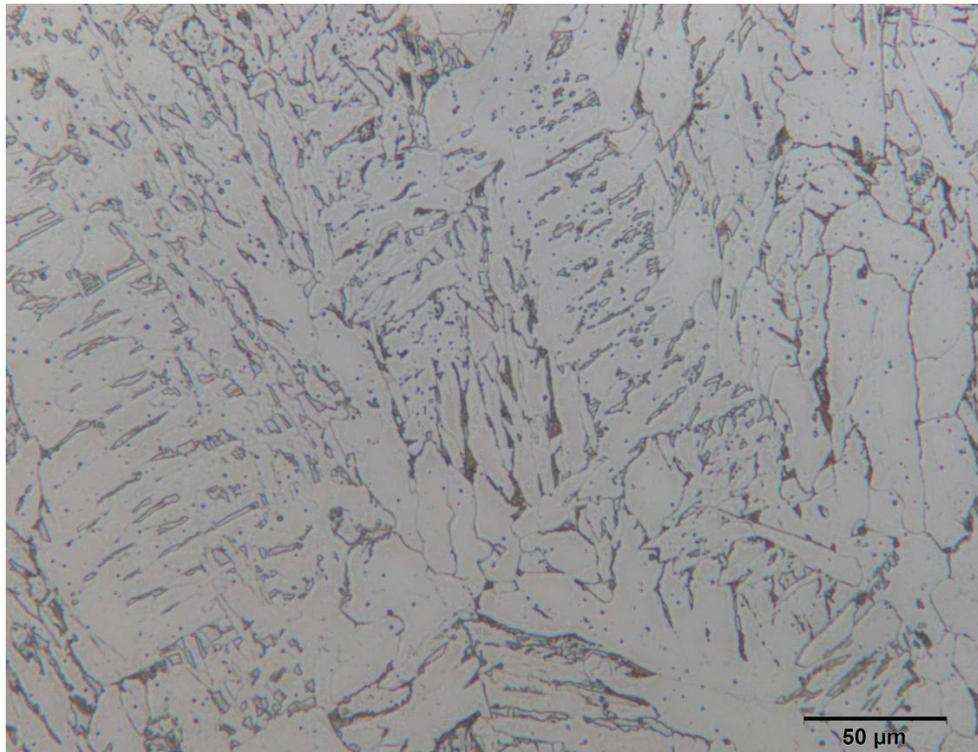
FONTE: O autor (2024).

FOTOGRAFIA 44 - MICROGRAFIA DA 4ª CAMADA DA PAREDE MADA.



FONTE: O autor (2024).

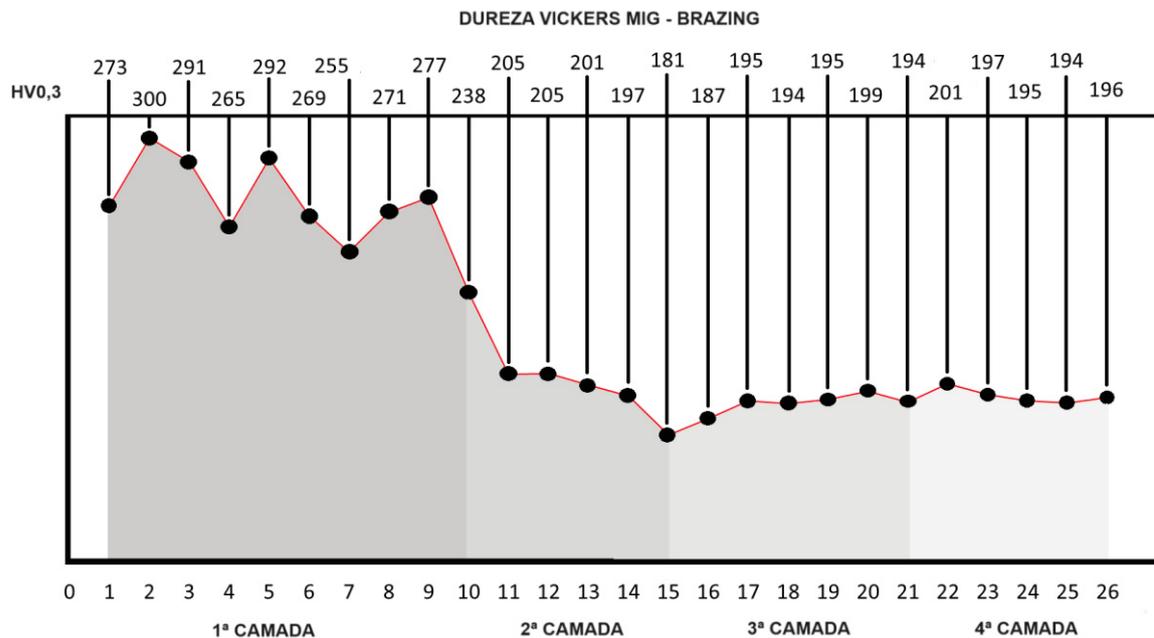
FOTOGRAFIA 45 - MICROGRAFIA AMPLIADA DA 4ª CAMADA DA PAREDE MADA.



FONTE: O autor (2024).

Na FIGURA 14 é mostrado no gráfico a variação de microdureza Vickers entre a 1ª até a 4ª camada da parede MADA do revestimento MIG-Brazing, sendo o valor de dureza indicado a média de 2 medidas. As maiores durezas ocorreram na 1ª camada, onde foram realizados 10 pontos de medição, os valores estão na faixa de 273 a 300 HV0,3, caindo gradativamente para as demais camadas, a 4ª camada ficou entre 194 a 196 HV0,3. A maior dureza da 1ª camada seria explicada pela taxa de resfriamento e a formação da ferrita refinada. Nota-se que a camadas subsequentes mantem um nível de dureza aproximadas.

FIGURA 14 - GRÁFICO DA MICRODUREZA DA PAREDE SOBRE MIG-BRAZING.



FONTE: O autor (2024).

Destacamento e análise da parede MADA sobre o revestimento do arame ER70S-6 (arame cobreado).

Na Fotografia 46 é apresentada a parede MADA fabricada com arame cobreado. Realizou-se o teste de martelamento na lateral da parede MADA, utilizando de força excessiva. Assim como havia a possibilidade de fragilizar devido à ausência do gás de proteção que tornou o revestimento poroso, era esperado também que poderia ocorrer uma forte interação entre o revestimento e a parede MADA, basicamente por serem de materiais similares e foi o que ocorreu, não sendo possível a destacabilidade.

Na Fotografia 46 na seta em vermelho é possível ver claramente a fratura na interface do revestimento e o dobramento da parede durante o teste, o que não foi o suficiente para a separação da parede MADA. Em decorrência dessas observações, decidiu-se interromper os ensaios subsequentes de macrografia, micrografia e microdureza, devido à inviabilidade da separação entre a parede e o revestimento.

FOTOGRAFIA 46 - DESTACAMENTO DA PAREDE MADA DO REVESTIMENTO DE ARAME ER70S-6.



FONTE: O autor (2024).

4.3.4 Destacamento e análise da parede MADA sobre o corpo de prova de ferro fundido.

Antes de analisar a parede MADA diretamente sobre o corpo de prova de ferro fundido cinzento, foi feita uma metalografia para verificar exatamente qual tipo de ferro fundido cinzento foi utilizado. Na FOTOGRAFIA 47 é mostrada a metalografia do corpo de prova. A microestrutura é composta de lamelas de grafita com distribuição vermicular, e a matriz em volta destas lamelas é predominantemente perlítica. Com tais características, podemos classificar este material como sendo um ferro fundido cinzento.

FOTOGRAFIA 47 - MACROGRAFIA DO FERRO FUNDIDO.



FONTE: O autor (2024).

A FOTOGRAFIA 48 é mostrada o destacamento da parede MADA depositada diretamente sobre o corpo de prova de ferro fundido cinzento, após o teste de martelamento. A separação ocorreu de maneira frágil, com um leve martelamento, sendo localizada totalmente no corpo de prova, a uma profundidade de aproximadamente 1mm. A superfície da fratura se mostrou uniforme, variações de altura em todo o comprimento da parede MADA.

FOTOGRAFIA 48 - DESTACAMENTO DA PAREDE MADA DO CORPO DE PROVA DE FERRO FUNDIDO.



FONTE: O autor (2024).

Na FOTOGRAFIA 49 é mostrado o perfil da parede MADA obtido. Observa-se que o perfil é bem regular, sendo que as diversas camadas possuem aproximadamente a mesma largura. A 1ª camada é ligeiramente mais larga, apresenta uma coloração escurecida, sendo que na base desta camada onde ocorreu a separação apresenta uma coloração esbranquiçada. Nota-se ainda que a 2ª e 3ª camada também são levemente mais escuras em relação as demais (acima destas).

FOTOGRAFIA 49 - MACROGRAFIA DA PAREDE MADA SOBRE O FERRO FUNDIDO.



FONTE: O autor (2024).

Na FOTOGRAFIA 50 é mostrada a metalografia ampliada da região do destacamento. Nota-se que a região branca apresenta uma microestrutura contendo lamelas de grafita somente na parte inferior, sendo o restante composto de martensita não revenida, austenita retida e um microconstituente que se assemelha a ledeburita. Tais características indicam que nesta região houve fusão, com diluição do ferro fundido no arame, ocasionando a dissolução da grafita.

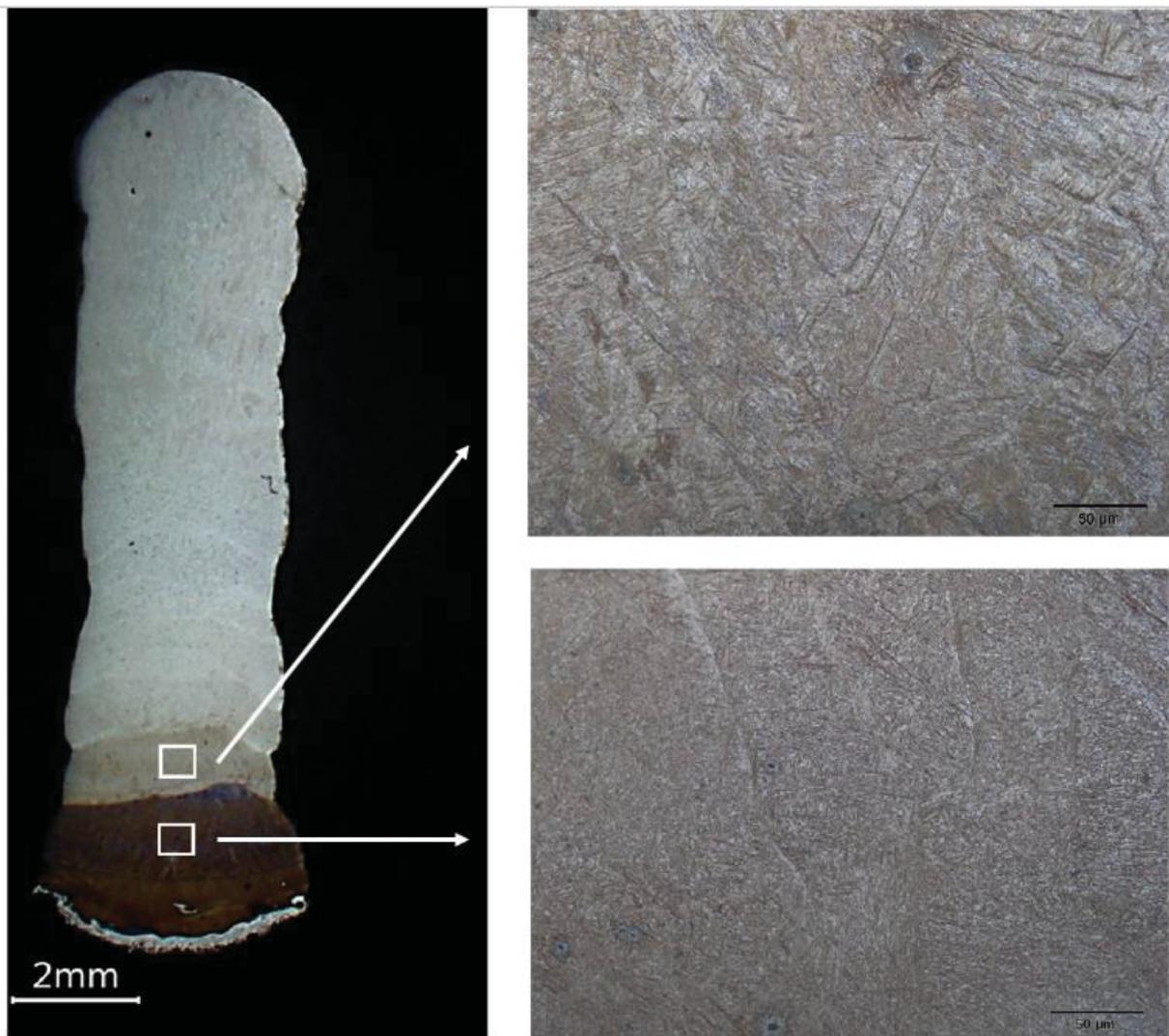
FOTOGRAFIA 50 - METALOGRAFIA AMPLIADA DA 1ª CAMADA NA REGIÃO DO DESTACAMENTO.



FONTE: O autor (2024).

Na FOTOGRAFIA 51 são mostradas as metalografias da 2ª e 3ª camadas. Observa-se que a microestrutura mostra grãos colunares, sendo as fases presentes seriam provavelmente martensita e bainita. Isto decorreria do fato da diluição do ferro fundido cinzento; com alto teor de Carbono se propagar para as camadas inferiores, aumentando a sua temperabilidade e favorecendo a ocorrência de tais microconstituintes.

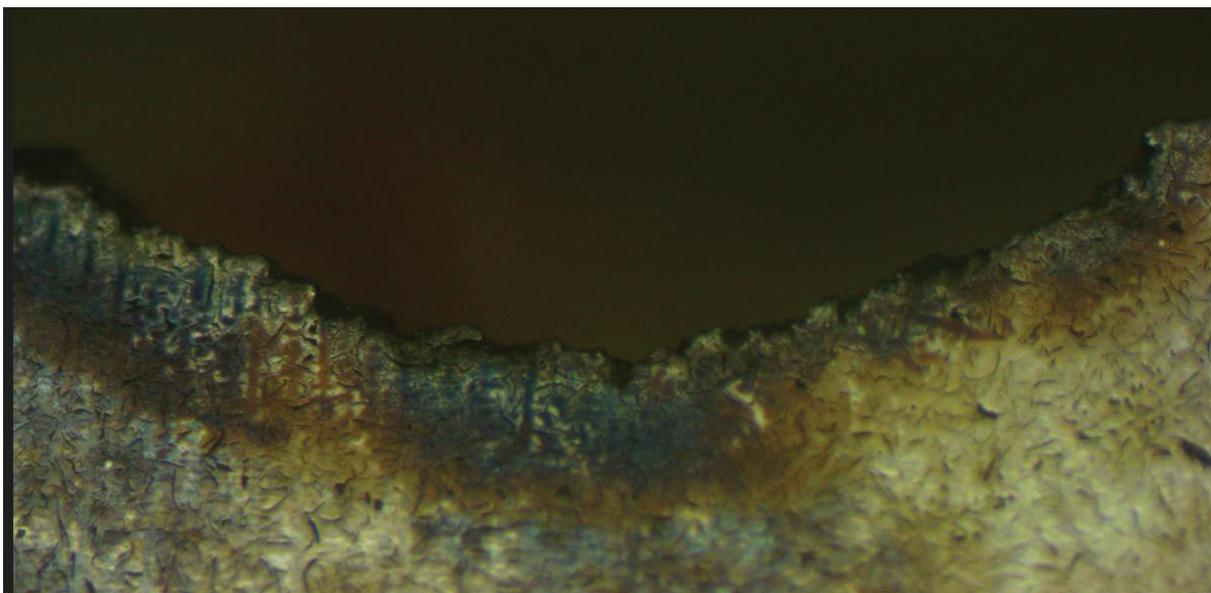
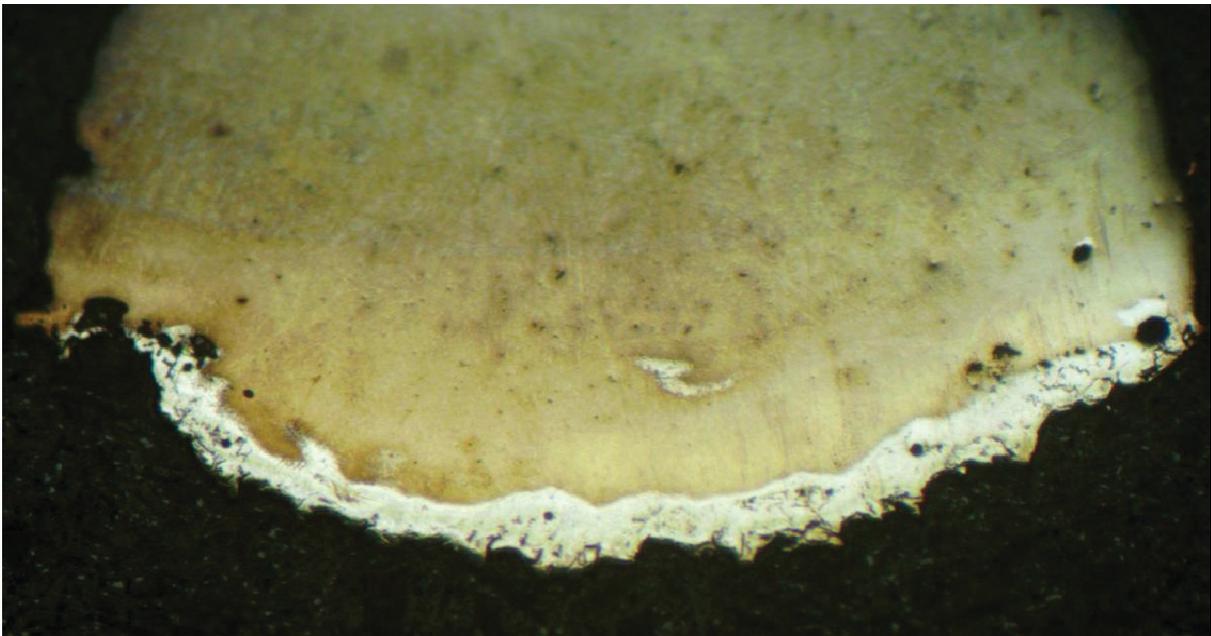
FOTOGRAFIA 51 - MACROGRAFIAS DA 2ª E 3ª CAMADA DA PAREDE MADA DE FERRO FUNDIDO.



FONTE: O autor (2024).

A região esbranquiçada apresentando lamelas de grafita na parte inferior observadas na FOTOGRAFIA 50 sugere que a fratura que ocasionou o destacamento da parede MADA teria ocorrido na ZTA. Para tentar confirmar esta hipótese, são mostradas na FOTOGRAFIA 52 as duas seções transversais da superfície de fratura. Na parte superior observa-se a parede MADA, e na parte inferior está a cavidade deixada pelo destacamento no ferro fundido. A fratura ocorreu exatamente no limite inferior da região esbranquiçada, que não aparece no ferro fundido.

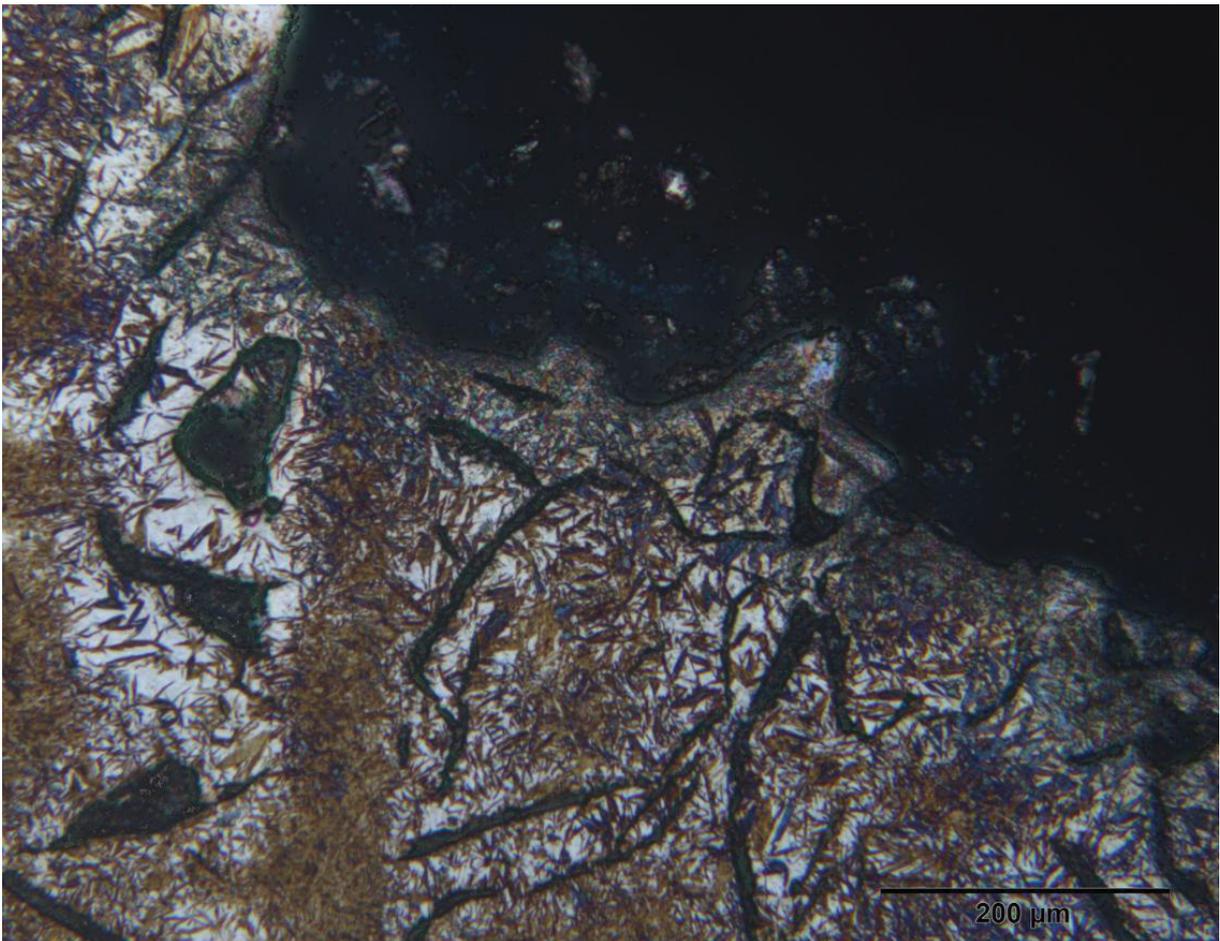
FOTOGRAFIA 52 - MONTAGEM MOSTRANDO A PARTE INFERIOR DA PAREDE E A PARTE SUPERIOR DO CORPO DE PROVA DE FERRO FUNDIDO.



FONTE: O autor (2024).

Uma ampliação na região da superfície de fratura do ferro fundido é mostrada na FOTOGRAFIA 53. Observa-se as lamelas de grafita, envolvidas por martensita e austenita retida, o que seria uma ZTA com transformação parcial. Os resultados mostrados nas FOTOGRAFIAS 52 E 53 indicam que a fratura ocorreu em uma região da ZTA, praticamente junto a zona fundida.

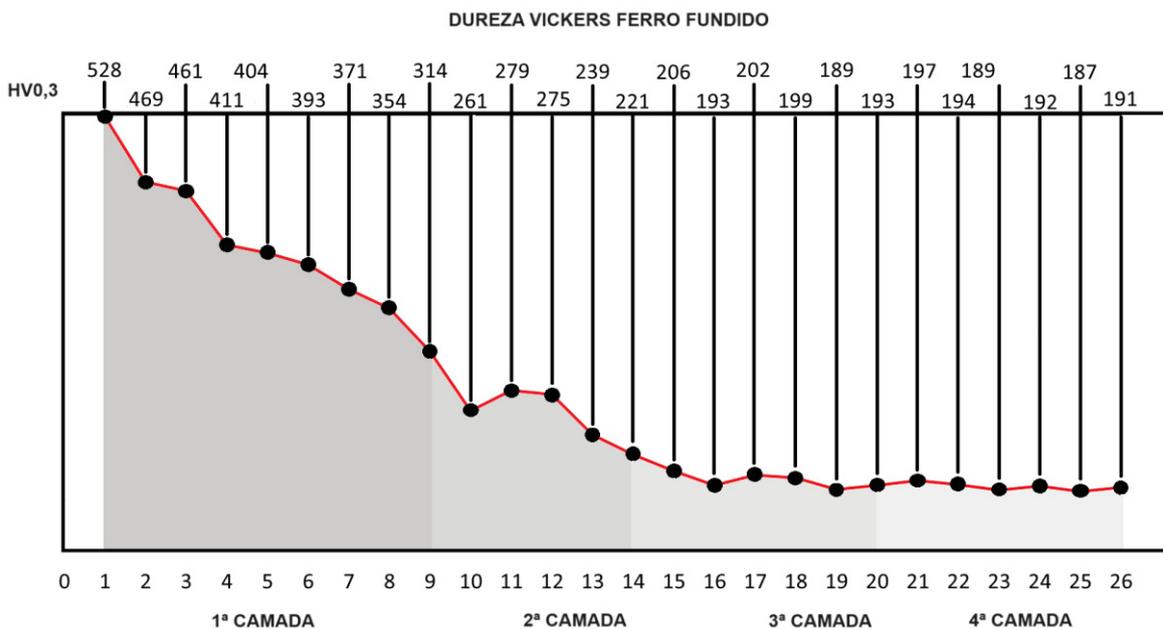
FOTOGRAFIA 53 - METALOGRAFIA DA SUPERFÍCIE DA FRATURA NO FERRO FUNDIDO CINZENTO.



FONTE: O autor (2024).

Na Figura 16 é apresentado o gráfico da variação da microdureza Vickers entre a 1ª e a 4ª camada da parede MADA depositada sobre o corpo de prova de ferro fundido cinzento, sendo que os valores de dureza indicados representam a média de duas medidas. A maior dureza foi registrada na 1ª camada, na região esbranquiçada, resultando em 528 HV0,3. As medidas subsequentes diminuíram progressivamente, chegando a 221 HV0,3 no início da 3ª camada. A partir deste ponto a dureza varia pouco, até que na 4ª camada a dureza estabiliza ao redor de 190 HV0,3. Tal perfil demonstra a influência da diluição do ferro fundido nas camadas inferiores, onde o aumento do teor de C nestas camadas ocasionou o aumento de dureza observado.

FIGURA 15 - GRÁFICO DA MICRODUREZA DA PAREDE MADA SOBRE O FERRO FUNDIDO.



FONTE: O autor (2024).

5 DISCUSSÃO.

Sobre os revestimentos utilizou-se variedades de matérias e métodos de aplicação, explorando alternativas para facilitar a destacabilidade de peças fabricadas por MADA. A fabricação das peças MADA foram realizadas através do processo MIG-MAG com o auxílio de um robô de soldagem ABB utilizando fonte CMT por curto-circuito controlado, mostrou-se adequada para a fabricação da parede em questão. Buscou-se trabalhar com uma geometria simples, de maneira rápida e eficiente. Destacam-se ainda os seguintes pontos: produzir peças isentas de defeitos, com boas características geométricas, microestruturais e propriedades mecânicas adequadas.

- **Brasagem**

Foscoper brasado.

O revestimento do foscoper brasado foi realizado de forma manual onde exigiu habilidade do operador e precisou de alguns critérios para aplicação. Como; pré-aquecer o corpo de prova para aplicar o fluxo, para após, fundir o material sobre o corpo de prova. Quando aplicado o foscoper brasado é percebido que não se tem um controle de aplicação para deixar o revestimento na forma e espessura esperado devido a característica do processo. Sendo após aplicação necessário realizar o esmerilhamento para deixar o revestimento na espessura definida para receber o processo MADA, visto que no momento do esmerilhamento é percebido algumas porosidades no revestimento o que veio futuramente a interferir na fabricação da peça MADA. A peça visualmente obteve boas características e a separação se deu com facilidade, destacando-se nos intermetálicos como notado nos resultados, porém ao analisar as macrografias é visto que a peça MADA apresentou porosidade significativa, assim como o revestimento.

O foscooper brasado como revestimento aplicado para destacabilidade não se tornou um método adequado no caso deste trabalho, porque o super flux 3 interagiu com a poça de fusão causando porosidades na peça MADA, porém, não se descarta a utilização do foscooper e do processo de brasagem, desde que se realize um estudo mais aprofundado do controle do processo, quanto a aplicação do revestimento e a fabricação da peça afim de evitar as porosidades. Outra característica apresentada é da diluição do que se acredita ser o cobre na estrutura da peça. O que reforça o estudo de outros métodos de aplicação como por exemplo, aplicar o foscooper pelo processo de soldagem TIG a fim de evitar tais condições.

- **Aspersão térmica.**

Os revestimentos aplicados por aspersão térmica foram realizados de forma manual onde exigiu habilidade do operador para aplicação. Para aplicação precisou utilizar-se de procedimentos que vem desde a limpeza da superfície do corpo de prova, ao pré-aquecimento e a forma de aplicação. O resultado da aplicação do revestimento por aspersão demonstrou-se satisfatória em ambos os casos (Foscooper e Alumínio), pois mostrou regularidade, uniformidade na espessura do revestimento, não se fazendo necessário o esmerilhamento.

Foscooper aspergido.

Ao fabricar a parede MADA sobre o revestimento de foscooper aspergido, observou-se, de modo geral, que a parede apresentava boas características estruturais e entre camadas, boa uniformidade, boa aparência e aderência com o revestimento. Após a fabricação, a separação ocorreu de forma fácil, sem necessidade de esforço excessivo. No entanto, ao contrário do foscooper brasado, a separação do foscooper aspergido ocorreu na interface entre o corpo de prova e o revestimento, sem criar intermetálicos nestas superfícies. Acredita-se que, devido à baixa aderência causada pela aspersão entre ambas as superfícies e sem ligações metalúrgicas, ocorrendo uma separação mecânica dos materiais.

O foscooper aspergido apresenta-se como uma alternativa viável, desde que se desenvolva uma metodologia a garantir uma melhor aderência do revestimento ao corpo de prova para quando fabricar a peça MADA poder criar intermetálicos para destacar-se por esse método. Outra observação é que a fabricação da peça não interaja metalurgicamente com o revestimento. Isso é crucial, por acreditar ser o cobre presente nas camadas das peças, tais interações podem causar trincas quentes nos contornos dos grãos comprometendo a parede MADA conforme apresentado nos resultados.

Alumínio aspergido.

Ao fabricar a parede MADA sobre o revestimento de alumínio aspergido, observou-se uma dificuldade na aplicação do metal de adição sobre o revestimento de alumínio. Visualmente, foi notada uma instabilidade do arco, resultando em várias falhas na parede e um acabamento insatisfatório. Neste caso, devido à baixa aderência entre os materiais do metal de adição e o corpo de prova, a separação ocorreu com extrema facilidade. A parede estava fixada apenas em pequenos pontos ao longo do cordão de prova sobre o revestimento.

O alumínio aspergido como alternativa, neste trabalho apresentou-se inviável devido as características apresentadas, o que não descarta a possibilidade de realizar-se novos estudos com novas metodologias de aplicação do revestimento de alumínio e/ou parâmetros para aplicação da MADA sobre o revestimento aspergido. Outra abordagem possível é utilizar um corpo de prova de aço ao carbono, revestir com alumínio aspergido e fabricar a peça MADA a partir de alumínio. Isso se deve às características da aspensão, que podem resultar em uma separação frágil ou até mesmo uma baixa aderência entre o revestimento e o corpo de prova.

- **Arco Elétrico.**

Os revestimentos aplicados pelo processo a arco elétrico foram realizados de forma automatizada pelo robô de soldagem, embora ainda fosse necessária a presença de um operador com habilidades para configurar os parâmetros. Após a parametrização do robô, acompanhou-se a aplicação do revestimento pelo método de tecimento, ficando os revestimentos aplicados com a largura adequada. No entanto, no caso do MIG-Brazing, foi necessário realizar um esmerilhamento para deixar a superfície do revestimento plana, preparando-a para receber a fabricação da peça MADA. O esmerilhamento não se tornou necessário no caso do arame cobreado, aplicado sem o uso de gás de proteção, da forma que ficou a superfície do revestimento aplicou-se a MADA.

MIG-Brazing.

Ao fabricar a parede MADA sobre o revestimento de MIG-Brazing, observou-se, de forma geral, que a parede apresentava boas características estruturais entre camadas, exibindo uniformidade, boa aparência e aderência com o revestimento. A destacabilidade da peça MADA de MIG-Brazing ocorreu facilmente, sem a necessidade de aplicar de força excessiva.

Uma característica notável foi o formato trapezoidal da primeira camada, que pode ter contribuído para facilitar a remoção. Além disso, esperava-se encontrar cobre diluído na primeira camada como ocorreu com o foscoper brasado e aspergido, devido a presença do cobre também no MIG-Brazing, porém, isso não foi observado nesse caso. É possível apenas observar um filme de cobre na superfície da região destacada da primeira camada. Possivelmente, o resfriamento, resultante da dissipação do calor pelo cobre, moldou o perfil da primeira camada de forma que contribuiu para a ruptura na superfície do revestimento, uma vez que essa camada possui menor resistência mecânica em comparação com o material da parede.

O MIG-Brazing se apresenta como uma alternativa viável, pois o revestimento é de fácil aplicação e pode ser realizado de forma automatizada, com uma característica importante de um bom controle na taxa de deposição e formato do revestimento. No entanto, é importante ressaltar que o método de deposição automatizada do revestimento, realizado por tecimento, pode ser aprimorado. Uma possível melhoria seria depositar um cordão revestido mais espesso para melhor preparar a superfície para receber a peça MADA, evitando assim a necessidade de esmerilhamento para deixar a superfície do revestimento plana. Observa-se que a parede MADA fabricada sobre o revestimento não sofreu interações metalúrgicas nem deformações que comprometessem suas características. A parede apresentou uma estrutura consistente entre camadas, remoção do revestimento eficaz, deixando o corpo de prova para ser reutilizado.

Arame ER70 S-6 - (Arame cobreado).

Ao fabricar a parede MADA sobre o revestimento de arame cobreado, observou-se, de modo geral, que a parede apresentava boas características estruturais e entre camadas, boa uniformidade, boa aparência e aderência com o revestimento. Porém, devido à similaridade do corpo de prova, revestimento e metal de adição mesmo com a porosidade não foi possível realizar a separação da peça MADA do corpo de prova, mesmo exercendo uma força excessiva as duas não se separaram, o que ocasionou um dobramento. Sendo que por esse motivo acredita-se não ser uma boa alternativa.

MADA sobre corpo de prova de ferro fundido.

Nesta metodologia, a parede MADA foi fabricada diretamente sobre o corpo de prova de ferro fundido. A parede apresentou boas características estruturais entre camadas, com uniformidade e aderência satisfatórias ao corpo de prova, além de aspectos visuais favoráveis. Uma diferença notável em comparação com outras metodologias foi a espessura mais fina da parede, mesmo com a primeira camada sendo ligeiramente mais larga. Acredita-se que isso se deva às dimensões do bloco do corpo de prova, que ajudou a dissipar melhor o calor. A destacabilidade da parede ocorreu facilmente, sem exigir esforço. Era esperada a formação de ferro fundido branco e que a remoção ocorresse nessa região, devido à sua dureza e facilidade de fragilização. No entanto, a separação ocorreu abaixo da camada coquilhada, sugerindo que se deu na zona termicamente afetada.

A fabricação da peça MADA diretamente sobre o corpo de prova de ferro fundido mostra-se como uma alternativa viável, não apenas devido à facilidade de separação, mas também por não ter causado deformações na parede MADA durante o processo. É importante destacar a usinagem de acabamento da parede, que pode enfrentar desafios devido à dureza do ferro fundido branco, como evidenciado pelo gráfico de microdureza, especialmente considerando suas características.

6 CONCLUSÃO

Este estudo teve como propósito investigar conceitos, técnicas e processos relacionados à aplicação de revestimentos e aplicação direta da parede MADA sobre o corpo de prova. Com base nas aplicações, constatou-se utilizar dos métodos de maneira satisfatória, como; utilizar-se da aplicação dos revestimentos por meio de brasagem, aspensão térmica e a arco elétrico; utilizando-se de parâmetros adequados para a fabricação da parede MADA; e dos testes qualitativos de martelamento para o destacamento. Além disso, alguns critérios propostos para serem alcançados incluíam garantir que o revestimento aplicado sobre o corpo de prova não reagisse a peça MADA, facilitar a remoção das peças MADA do corpo de prova e que permitisse a reutilização deste corpo de prova.

Entre os processos avaliados que melhor apresentou as características esperada para receber a fabricação da peça MADA, destacam-se como as mais promissoras a fabricação direta da peça MADA sobre o corpo de prova de ferro fundido e o revestimento utilizando MIG-Brazing.

- No primeiro caso, a fabricação se dá diretamente na peça MADA ao corpo de prova, mostrando-se vantajosa devido à ausência de aplicação de revestimento, especialmente considerando que o ferro fundido é um material acessível em termos de custo.
- No caso do revestimento de MIG-Brazing, a aplicação através do robô de soldagem é uma diferencial por ser uma aplicação automatizada. Levando-se em consideração a destacabilidade da peça MADA que ocorreu com facilidade. Outra característica importante e que a estrutura metalúrgica da peça permanece inalterada, sem reagir o revestimento com a parede MADA.
- Os outros revestimentos, como o fosco per brasado, alumínio aspergido juntamente com seus processos correspondentes, podem ser aprimorados para solucionar os problemas identificados com o objetivo de tornar a aplicação desses revestimentos viável.

Sugestões para trabalhos futuros.

- Otimizar a aplicação do revestimento de foscooper por aspersão, sendo essencial ajustar sua espessura. Além disso, ao ajustar a espessura do revestimento, aplicar parâmetros adequando de fabricação MADA para evitar a fusão da primeira camada do metal de adição com o corpo de prova e aprimorar o método a fim de evitar a diluição do cobre na primeira camada.
- MIG Brazing – Desenvolver um passe de revestimento de MIG-Brazing como uma camada de sacrifício com espessura do cordão espesso para auxiliar na dissipação do calor, sendo necessário desenhar essa camada de acordo com a geometria da peça, ajustando parâmetros apropriados para prepará-la para receber a fabricação MADA.
- Ferro Fundido – Desenvolver métodos para reduzir a influência do ferro fundido branco, a fim de prevenir a elevada dureza do material e facilitar sua usinagem, tais como; ajustar os parâmetros, taxa de resfriamento.

7. REFERÊNCIAS

AIRES, M. O. *et al.* Indústria 4.0: A Manufatura Aditiva como Ferramenta de Inovação e Otimização. *In: FATEC GUARULHOS (Org.) X FATECLOG - LOGÍSTICA 4.0 & A SOCIEDADE DO CONHECIMENTO 2019, GUARULHOS/SP. Anais [...]. GUARULHOS/SP: ISSN 2357-9684, 2019.*

ALBERTI, E. A, SILVA, L. J, D' OLIVEIRA, A. S. C. M. Manufatura aditiva: o papel da soldagem nesta janela de oportunidade. *Soldagem & Inspeção*, v. 19 n. 2, p.190-198, 2014.

AWS - AMERICAN WELDING SOCIETY. *Brazing Handbook*. 4ª Ed. 1991.

ANDRADE CENTENO, D. M. Análise microestrutural de junta brasada de aço inoxidável duplex UNS S32101, UNS S32304, UNS S32750 e UNS S32707 com metal de adição à base de níquel. 2013. 128 f. Dissertação (Mestrado em Ciências). Universidade de São Paulo, São Paulo, 2013.

ARTAZA, T. *et al.* Wire arc additive manufacturing Ti6Al4V aeronautical parts using plasma arc welding: Analysis of heat-treatment processes in different atmospheres. *Journal of Materials Research and Technology*, v. 9, n. 6, 2020.

CUNHA, R. MX3D imprimiu uma ponte de aço inoxidável para cruzar um dos canais mais antigos de Amsterdã. *Stylourbano*, 2023. Disponível em: <https://www.stylourbano.com.br/mx3d-imprimiu-uma-ponte-de-aco-inoxidavel-para-cruzar-um-dos-canais-mais-antigos-de-amsterda/>. Acesso em: 30 dez. 2023.

DING, J. *et al.* Thermo-mechanical analysis of Wire and Arc Additive Layer Manufacturing process on large multi-layer parts. *Computational Materials Science*, v. 50, n. 12, p. 3315–3322, 2011.

FEDELE, R. Desafios da soldagem em tubulações. *Revista Metalurgia e Materiais*, p. 322, 2002.

FERREIRA, V. M. V. PROCESSO “MIG-BRAZING”: variáveis, aplicabilidade e avaliação das propriedades da junta. 2023. 80 f. Monografia (Especialização em Soldagem) – Faculdade de Engenharia da Universidade Federal de Minas Gerais, 2023.

FRONIUS, I. CMT: Cold Metal Transfer. *Austria*. [s./l.], 2005.

GONDIN, L. R. Projeto de afiador de eletrodos de tungstênio automatizado para soldagem TIG. 2018. 58 f. Monografia (Engenharia Mecatrônica). Centro Federal de Educação Tecnológica de Minas Gerais, Divinópolis, 2018.

GODINA, R. *et al.* Impact Assessment of Additive Manufacturing on Sustainable Business Models in Industry 4.0 Context. *Sustainability*, [s. l.], v. 12, n. 17, p. 7066, 2020.

ZAZYCKI, E. A.; SOUZA, V. P. União de tubos hidráulicos de alta pressão por brasagem: Estudo de caso. FAHOR, Curso de Engenharia Mecânica, Faculdade Horizontina, 2017.

HALEEM, A.; JAVAID, M. Additive Manufacturing Applications in Industry 4.0: A Review. *Journal of Industrial Integration and Management*, [s. l.], v. 04, n. 04, p. 1930001, 2019.

HAMATAMI, H., MIYAZAKI, Y. Optimization of an electron beam remelting of HVOF sprayed alloys and carbides. *Surface and Coating Technology*, v.154, p.176-181, 2002.

HU, Zeqi *et al.* Understanding and overcoming of abnormality at start and end of the weld bead in additive manufacturing with GMAW. *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, v. 95, n. 5-8, p. 2357-2368, 2018.

KARAPATIS, N. P.; VAN GRIETHUYSEN, J. P. S.; GLARDON, R. Direct rapid tooling: a review of current research. *Rapid Prototyping Journal*, [s. l.], v. 4, n. 2, p. 77–89, 1998.

KRUTH, J. P.; LEU, M. C.; NAKAGAWA, T. Progress in Additive Manufacturing and rapid prototyping. *CIRP Annals*, v. 47, n. 2, p. 525-540. 1998.

KUNIEDA, M.; KATOH, R.; MORI, Y. Rapid Prototyping by Selective Electrodeposition using electrolyte Jet. *CIRP Annals*, v. 47, n. 1, p. 161-164. 1998.

KOVALENKO, O. 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. 231 f. Tese (Doutorado Engenharia Mecânica). Universidade Federal de Uberlândia, Uberlândia, 2019.

LEE, Y. S. *et al.* Role of scan strategies on thermal gradient and solidification rate in electron beam powder bed fusion. *Additive Manufacturing*, [s. l.], v. 22, p. 516–527, 2018.

LINDEMANN, C. *et al.* Analyzing Product Lifecycle Costs for a Better Understanding of Cost Drivers in Additive Manufacturing. *In: (At. Austin, Org.) CONFERENCE: SOLID FREEFORM FABRICATION SYMPOSIUM - AN ADDITIVE MANUFACTURING CONFERENCE*, Texas, USA. Anais [...]. Texas, USA. p. 177–238. 2012

MA, C. *et al.* Research on Automated Defect Classification Based on Visual Sensing and Convolutional Neural Network-Support Vector Machine for GTA-Assisted Droplet Deposition Manufacturing Process. *Metals*, v. 11, n. 4, p. 639, 2021.

MARINELLI, G. *et al.* Microstructure, hardness and mechanical properties of two different unalloyed tantalum wires deposited via wire + arc additive manufactur. *International Journal of Refractory Metals & Hard Materials*, v. 83, p. 1-9. 2019.

MAGALHÃES, V. A. N. Simulação Física por Retificação da Soldagem de Dutos com processo GMAW. 2012. 151 f. Dissertação (Mestrado Engenharia Mecânica). Universidade Federal de Uberlândia, Uberlândia, 2012.

MODENESI, P. J.; MARQUES, P. V.; SANTOS, D. B. Introdução a metalurgia da soldagem. Belo Horizonte: UFMG, 2012.

NOVELINO, A. L. B. *et al.* Methods for wire and arc additive manufacturing of metals: a review. 11º Congresso Brasileiro de Engenharia de Fabricação. 2021.

OLSON, D. L. *et al.* Welding Brazing and Soldering. [s.l.] ASM International, v. 6, 1993.

OMNE, O. Redefinindo o projeto com a manufatura aditiva. 2018. Disponível em: https://www.sandvik.coromant.com/pt-pt/mww/pages/inn_amcenter.aspx. Acesso em: 30 nov. 2022.

PAWLOWSKI, L. The science and engineering of thermal spray coatings. England: John Wiley & Sons, 1995.

RAMLAB. World's first class approved 3D printed ship's propeller. <https://ramlab.com/updates/ramlab-unveils-worlds-first-class-approved-3d-printed-ships-propeller/>, 2017. Acesso em: 21-11-2022.

ROCHA, D. B. Estudo da Soldabilidade do Tubo Api 5L X80 utilizando os processos de Soldagem: MAG com Transferência controlada e eletrodo Tubular. 2010. 218 f. Dissertação (Mestrado Engenharia Metalúrgica e de Materiais). Escola Politécnica da Universidade de São Paulo, São Paulo, 2010.

SANTOS JÚNIOR, M. C. Influência Da Transferência Metálica por Curto-Circuito e CMT na Geometria do Cordão e Características da ZTA do dual Phase DP 600. 2012. 94 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Mecânica). Universidade Federal do Paraná - UFPR, Curitiba, 2012.

SCHORGHUBER, M. Cold-Metal-Transfer Welding Process and Welding Installation. Google Patents, US Patent App.11/920,516. 2009.

SILVA, B. H. S. Avaliação e Aplicabilidade de Arame Ultrafino em Manufatura Aditiva por Deposição a Arco (MADA). 2020. 92 f. Dissertação (Mestrado Engenharia Mecânica). Universidade Federal de Uberlândia, Uberlândia, 2020.

TABERNERO, I. *et al.* Study on Arc Welding Processes for High Deposition Rate Additive Manufacturing, in Procedia CIRP, v. 68, 2018.

THORPE, M. L. Thermal spray – industry in transition. Advanced Materials & Process, v.5, p. 50-61, 1993.

VEIGA, F. *et al.* Analysis of the machining process of titanium Ti6Al-4V parts manufactured by wire arc additive manufacturing (WAAM), Materials, v. 13, n. 3, 2020.

VIMAL, K. E.; SRINIVAS, M. N.; RAJAK, S. Wire arc additive manufacturing of aluminium alloys: A review. *Materials Today: Proceedings*, p. 1-7. 2020

TONG, H. *et al.* Quality and Productivity in Aluminium Alloy Thin Sheet Welding Using Alternating Current Pulsed Metal Inert Gas Welding System. *Science and Technology of Welding and Joining*, v. 6, n. 4, 2001.

MARINHA PROTAIS. Esta hélice de barco impressa em 3D obtém certificação oficial pela primeira vez. *Usinenouvelle*, 2017. Disponível em: <https://www.usinenouvelle.com/editorial/video-cette-helice-de-bateau-imprimee-en-3d-obtient-une-certification-officielle-pour-la-premiere-fois.N622008>. Acesso em: 30 dez. 2023.

XIONG, J; YIN, Z.; ZHANG, W. Forming appearance control of arc striking and extinguishing area in multi-layer single-pass GMAW-based additive manufacturing. *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, v. 87, n. 1-4, p.579-586, 2016.

WAINER, E.; BRANDI, S.; MELO, F. *Soldagem: processos e metalurgia*. 9ª Ed. São Paulo: Blucher. 1992.

WILLIAMS, S. W. *et al.* Wire + Arc additive manufacturing. *Materials Science and Technology (United Kingdom)*, v. 32, n. 7, p. 641–647, 2016.

WU, B. *et al.* A review of the wire arc additive manufacturing of metals: properties, defects and quality improvement, *Journal of Manufacturing Processes*, v. 35, p. 127-139, 2018.

WU, Q. *et al.* Effect of molten pool size on microstructure and tensile properties of wire arc additive manufacturing of Ti-6Al-4V alloy. *Materials*, v. 10, n. 7, 2017