

Universidade Federal de Goiás – UFG

Escola de Engenharia Elétrica, Mecânica e de Computação

Yago de Moraes Machado

**Estudo do uso da escória ferro-níquel no processo de soldagem utilizando o processo
MIG/MAG adaptado para arco submerso**

GOIÂNIA

2023



UNIVERSIDADE FEDERAL DE GOIÁS
ESCOLA DE ENGENHARIA ELÉTRICA, MECÂNICA E DE COMPUTAÇÃO

TERMO DE CIÊNCIA E DE AUTORIZAÇÃO PARA DISPONIBILIZAR VERSÕES ELETRÔNICAS DE TRABALHO DE CONCLUSÃO DE CURSO DE GRADUAÇÃO NO REPOSITÓRIO INSTITUCIONAL DA UFG

Na qualidade de titular dos direitos de autor, autorizo a Universidade Federal de Goiás (UFG) a disponibilizar, gratuitamente, por meio do Repositório Institucional (RI/UFG), regulamentado pela Resolução CEPEC no 1240/2014, sem ressarcimento dos direitos autorais, de acordo com a Lei no 9.610/98, o documento conforme permissões assinaladas abaixo, para fins de leitura, impressão e/ou download, a título de divulgação da produção científica brasileira, a partir desta data.

O conteúdo dos Trabalhos de Conclusão dos Cursos de Graduação disponibilizado no RI/UFG é de responsabilidade exclusiva dos autores. Ao encaminhar(em) o produto final, o(s) autor(a)(es)(as) e o(a) orientador(a) firmam o compromisso de que o trabalho não contém nenhuma violação de quaisquer direitos autorais ou outro direito de terceiros.

1. Identificação do Trabalho de Conclusão de Curso de Graduação (TCCG)

Nome completo do autor: Yago de Moraes Machado

Título do trabalho: Estudo do uso da escória ferro-níquel no processo de soldagem utilizando o processoMIG/MAG adaptado para arco submerso

2. Informações de acesso ao documento (este campo deve ser preenchido pelo orientador) Concorda com a liberação total do documento [X] SIM [] NÃO¹

[1] Neste caso o documento será embargado por até um ano a partir da data de defesa. Após esse período, a possível disponibilização ocorrerá apenas mediante: a) consulta ao(à)(s) autor(a)(es)(as) e ao(à) orientador(a); b) novo Termo de Ciência e de Autorização (TECA) assinado e inserido no arquivo do TCCG. O documento não será disponibilizado durante o período de embargo.

Casos de embargo:

- Solicitação de registro de patente;
- Submissão de artigo em revista científica;
- Publicação como capítulo de livro.

Obs.: Este termo deve ser assinado no SEI pelo orientador e pelo autor.



Documento assinado eletronicamente por **Kléber Mendes De Figueiredo, Professor do Magistério Superior**, em 17/08/2023, às 14:59, conforme horário oficial de Brasília, com fundamento no § 3º do art. 4º do [Decreto nº 10.543, de 13 de novembro de 2020](#).



Documento assinado eletronicamente por **Yago De Moraes Machado, Discente**, em 17/08/2023, às 15:01, conforme horário oficial de Brasília, com fundamento no § 3º do art. 4º do [Decreto nº 10.543, de 13 de novembro de 2020](#).



A autenticidade deste documento pode ser conferida no site https://sei.ufg.br/sei/controlador_externo.php?acao=documento_conferir&id_orgao_acesso_externo=0, informando o código verificador **3972583** e o código CRC **6AC25735**.

Universidade Federal de Goiás – UFG

Escola de Engenharia Elétrica, Mecânica e de Computação

Yago de Moraes Machado

**Estudo do uso da escória ferro-níquel no processo de soldagem utilizando o processo
MIG/MAG adaptado para arco submerso**

Projeto Final de Curso apresentado como
requisito para obtenção do título de Bacharel
em Engenharia Mecânica pela Universidade
Federal de Goiás – Escola de Engenharia
Elétrica, Mecânica e de Computação.

Orientador: Kléber Mendes de Figueiredo

GOIÂNIA

2023

Ficha de identificação da obra elaborada pelo autor, através do
Programa de Geração Automática do Sistema de Bibliotecas da UFG.

Machado, Yago de Moraes

Estudo do uso da escória ferro-níquel no processo de soldagem
utilizando o processo MIG/MAG adaptado para arco submerso
[manuscrito] / Yago de Moraes Machado. - 2023.

44 f.: il.

Orientador: Prof. Dr. Kléber Mendes de Figueiredo.

Trabalho de Conclusão de Curso (Graduação) - Universidade
Federal de Goiás, Escola de Engenharia Elétrica, Mecânica e de
Computação (EMC), Engenharia Mecânica, Goiânia, 2023.

Bibliografia.

Inclui lista de figuras, lista de tabelas.

1. MIG/MAG. 2. Arco submerso. 3. Escória de ferro-níquel. I.
Figueiredo, Kléber Mendes de, orient. II. Título.

CDU 621



UNIVERSIDADE FEDERAL DE GOIÁS
ESCOLA DE ENGENHARIA ELÉTRICA, MECÂNICA E DE COMPUTAÇÃO

DECLARAÇÃO

ATA DE AVALIAÇÃO DE PROJETO FINAL

Curso

<input type="checkbox"/> Eng Elétrica	<input checked="" type="checkbox"/> Eng Mecânica	<input type="checkbox"/> Eng Computação PFC 1 () PFC 2 ()
---------------------------------------	--	--

Título do Trabalho

Estudo do uso da escória ferro-níquel no processo de soldagem utilizando o processo MIG/MAG adaptado para arco submerso

Banca Avaliadora

Membro 1	Kléber Mendes de Figueiredo
Membro 2	Renata Rodrigues Alves
Membro 3	Fleide Wilian Rodrigues Alves
Membro 4	Demostenes Ferreira Filho

Discente

Matrícula	Nome
201703940	Yago de Moraes Machado

NOTAS

	Membro 1			Membro 2			Membro 3			Membro 4			
Matrícula	NPT	NTE	NAA	NPT	NTE	NAA	NPT	NTE	NAA	NPT	NTE	NAA	Média*
201703940	9,3	7,8	8,5	9,0	8,0	8,5	9,0	8,5	9,0	10,0	7,0	8,0	8,3

NPT – Nota plano de trabalho;

NTE – Nota do trabalho escrito;

NAA – Nota de apresentação e arguição

Para Eng. Elétrica, Mecânica e PFC2 da Eng. Da Computação: $NF = 0,1 \times NPT + 0,45 \times NTE + 0,45 \times NAA$

Para PFC1 da Eng. Da Computação: $NF = 0,3 \times NPT + 0,7 \times NAA$

* A APROVAÇÃO DO(S) ALUNO(S) ESTÁ CONDICIONADA À APRESENTAÇÃO DO TRABALHO FINAL AO ORIENTADOR COM TODAS AS CORREÇÕES SUGERIDAS PELA BANCA.

OBSERVAÇÕES:

Preencher com modificações solicitadas, caso existam. Em caso de reprovação, informar a justificativa.



Documento assinado eletronicamente por **Kléber Mendes De Figueiredo, Professor do Magistério Superior**, em 16/08/2023, às 16:01, conforme horário oficial de Brasília, com fundamento no § 3º do art. 4º do [Decreto nº 10.543, de 13 de novembro de 2020](#).



Documento assinado eletronicamente por **Fleide Wilian Rodrigues Alves, Técnico de Laboratório**, em 16/08/2023, às 16:03, conforme horário oficial de Brasília, com fundamento no § 3º do art. 4º do [Decreto nº 10.543, de 13 de novembro de 2020](#).



Documento assinado eletronicamente por **Renata Rodrigues Alves, Técnico**, em 16/08/2023, às 16:04, conforme horário oficial de Brasília, com fundamento no § 3º do art. 4º do [Decreto nº 10.543, de 13 de novembro de 2020](#).



Documento assinado eletronicamente por **Demóstenes Ferreira Filho, Professor do Magistério Superior**, em 16/08/2023, às 16:05, conforme horário oficial de Brasília, com fundamento no § 3º do art. 4º do [Decreto nº 10.543, de 13 de novembro de 2020](#).



A autenticidade deste documento pode ser conferida no site https://sei.ufg.br/sei/controlador_externo.php?acao=documento_conferir&id_orgao_acesso_externo=0, informando o código verificador **3966107** e o código CRC **3DDE4D0D**.

Agradecimentos

Nesta jornada, expressamos nossos sinceros agradecimentos a todos que tornaram possível a realização deste estudo. Agradeço, primeiramente, a Deus, pela força e inspiração que Ele sempre me proporcionou ao longo deste percurso. À Universidade Federal de Goiás (UFG), por proporcionar um ambiente de aprendizado e pesquisa propício ao desenvolvimento deste trabalho. Ao Prof. Dr. Kléber Mendes de Figueiredo, meu orientador, que com sua sabedoria e orientação, guiou-me com maestria neste projeto. Seu apoio foi fundamental para a conclusão deste trabalho. Também agradeço ao Prof. Demóstenes, que além de ser membro da banca avaliadora, compartilhou conhecimentos valiosos e contribuiu significativamente para o enriquecimento deste estudo. Agradeço à Renata, ao Fleide e ao Cristiano, técnicos dos laboratórios e membros da banca avaliadora, pelo suporte técnico e pela disponibilidade em tirar dúvidas pontuais e disponibilidade para avaliar este trabalho. À minha família e amigos, agradeço por estarem ao meu lado em todos os momentos, pelo incentivo e compreensão. Vocês foram uma fonte constante de motivação. E, por fim, mas não menos importante, agradeço a mim mesmo, por ter acreditado em mim, por superar os desafios e perseverar nesta jornada.

A todos vocês, meu sincero agradecimento por fazerem parte desta conquista!

Resumo

Este estudo teve como objetivo investigar a viabilidade do uso de escória de ferro-níquel como fluxo para soldagem por arco submerso, incorporando carbono à sua composição para aumentar a dureza do cordão de solda. O processo experimental foi realizado em colaboração com a mineradora Anglo American, que forneceu a escória para pesquisa. Iniciando com a adaptação da máquina de solda MIG/MAG para arco submerso, desenvolveu-se um suporte impresso em 3D para a tocha de soldagem e um alimentador para o fluxo. Os parâmetros de soldagem foram testados e ajustados, resultando em um cordão de solda uniforme. A seguir, foram realizados ensaios de dureza e metalografia em diferentes amostras de cordões de solda sobre chapa. Uma amostra no processo MIG/MAG, para comparação com os resultados no processo de arco submerso. Nas amostras com arco submerso, foram realizados experimentos com e sem a retirada da carepa de laminação. Também foi realizado um experimento com 1% de carbono na composição do fluxo, a fim de aumentar a dureza do revestimento durante o processo de soldagem. Os resultados da metalografia apresentaram-se promissores e sem grandes flutuações nos valores de dureza, onde conclui-se que a escória pode sim ser utilizada como fluxo no processo de arco submerso, obtendo valores de dureza muito próximos dos valores obtidos no processo MIG/MAG convencional.

Palavras-chave: MIG/MAG; Arco submerso; Escória de ferro-níquel.

Abstract

This study aimed to investigate the feasibility of utilizing ferro-nickel slag as a flux for submerged arc welding by incorporating carbon into its composition to enhance the hardness of the weld bead. The experimental process was conducted in collaboration with Anglo American, a mining company, which provided the slag for research purposes. The initial phase involved the adaptation of the MIG/MAG welding machine for submerged arc welding. This adaptation included the development of a 3D-printed support for the welding torch and a flux feeder. Subsequently, the welding parameters were systematically tested and adjusted, resulting in the production of a uniform weld bead. Subsequently, hardness and metallography tests were performed on various samples of weld beads on steel plates. A sample was used with pure CO₂ in the MIG/MAG process to serve as a reference for comparison with the submerged arc welding process results. In the submerged arc samples, experiments were conducted both with and without the removal of the mill scale. Additionally, an experiment was conducted with 1% carbon in the flux composition to explore the potential of increasing the coating hardness during the welding process. The metallography results exhibited promising outcomes with minimal fluctuations in hardness values.

Keywords: MIG/MAG; Adaptation; Submerged Arc Welding; Ferro-Nickel Slag; Metallography; Grain Boundaries; Vickers Hardness.

Lista de figuras

Figura 1: Depósito de escória ferro-níquel em Barro-Alto (GO)	11
Figura 2: Esquema de soldagem MIG/MAG	13
Figura 3: Contorno de grão na ZTA.	20
Figura 4: Suporte MIG/MAG para Arco Submerso	21
Figura 5: Máquina de corte semi-automática (Tartaruga)	22
Figura 6: Máquina de solda SUMIG Eagle 405.	23
Figura 7: Máquina de corte por disco de abrasão Fortel CF 3.	25
Figura 8: Máquina de embutimento EFD 30.	25
Figura 9: Politriz PLF Fortel - lixamento e polimento.	26
Figura 10: Microscópio óptico ZEISS AXIO Imager M2m.	27
Figura 11: Durômetro Mitutoyo hv 100	28
Figura 12: Amostras para ajuste de parâmetros de solda	29
Figura 13: Amostra 2 - Cordão de solda de arco submerso e escória de soldadura	30
Figura 14: Amostra 0 - Cordão de solda sem penetração.	31
Figura 15: Amostra 1 - Cordão de solda MIG/MAG utilizando CO2 puro.	32
Figura 16: Amostra 1 - ZTA; MIG/MAG utilizando CO2 puro.	32
Figura 17: Amostra 2 - ZTA; Arco submerso.	33
Figura 18: Amostra 2 - Microestrutura; Arco submerso.	34
Figura 19: Amostra 3 -Cordão de solda arco submerso sem retirar carepa de laminação.	35
Figura 20: Amostra 3 - ZTA arco submerso sem retirar da carepa.	36
Figura 21: Amostra 3 - Microestrutura; Arco submerso sem retirar carepa.	37
Figura 22: Cordão de solda com 5% e 10% de carbono na composição do fluxo	38
Figura 23: Amostra 4 - Cordão de solda com 1% de carbono na composição do fluxo	38
Figura 24: Amostra 4 - ZTA arco submerso com 1% de carbono no fluxo.	39
Figura 25: Amostra 4 - Contorno de grão arco submerso com 1% de carbono.	40

Lista de tabelas

Tabela 1: Composição da Escória Ferro-níquel	17
Tabela 2: Parâmetros de solda	23
Tabela 3: Dureza Vickers de todas as amostras	41

Sumário

1. Introdução	10
2. Revisão Bibliográfica	12
2.1. Soldagem do tipo MIG/MAG	12
2.2. Soldagem do tipo arco submerso.	14
2.3. Parâmetros de solda para MIG/MAG convencional e Arco submerso.	15
2.4. Escória ferro-níquel	16
2.5. Metalografia e seus processos	18
3. Materiais e Métodos	21
3.1. Adaptação da máquina de solda MIG/MAG para arco submerso.	21
3.2. Teste e ajuste dos parâmetros de soldagem.	22
3.3. Realização de testes com adição de carbono.	24
3.4. Ensaio de dureza e metalografia.	24
4. Resultados	29
4.1. Parâmetros de solda.	29
4.2. Amostra 0 - cordão de solda sem penetração.	30
4.3. Amostra 1 - cordão de solda MIG/MAG utilizando CO ₂ puro.	31
4.4. Amostra 2 - Arco submerso.	33
4.5. Amostra 3 - Arco submerso sem retirar carepa de laminação.	35
4.6. Amostra 4 - Arco submerso 1% de carbono.	37
4.7. Comparação dos resultados.	40
5. Conclusão	42
6. Trabalhos futuros	43
7. Referências Bibliográficas	44

1.Introdução

O estado de Goiás (BR), tem conquistado reconhecimento mundial como um importante produtor de níquel, principalmente devido à presença de empresas de grande porte, como a Anglo American e a Votorantim Metais, no setor de mineração. Segundo o Instituto Brasileiro de Mineração (IBRAM), o ferro-níquel desponta como o minério mais exportado por Goiás, representando um valor de US\$519 milhões em 2013. [1]

O níquel possui uma ampla gama de aplicações industriais, sendo cerca de 65% utilizado na fabricação de aço inoxidável, além de desempenhar um papel crucial em setores como aeronáutica, produtos médicos e odontológicos, indústria alimentícia, química e de tecnologia em geral. [1]

Goiás se destaca como o maior produtor de níquel do país, sendo responsável por 82% da produção nacional, além de abrigar 74% das reservas brasileiras desse metal. A *Anglo American*, uma das principais mineradoras atuantes na região, possui duas unidades de produção de níquel em Goiás: a Codemin, localizada em Niquelândia, e o Projeto Barro Alto, situado no município de mesmo nome. O presidente dos Negócios Níquel, Nióbio e Fosfatos da Anglo American, Ruben Fernandes, destaca que Barro Alto e Niquelândia têm capacidade para produzir 40 mil toneladas de níquel contido em ferro-níquel. A unidade de Barro Alto, inaugurada em 2011 após um investimento de US\$1,9 bilhão, contribui majoritariamente com cerca de 30 mil toneladas desse total. A Codemin, em operação desde 1982, possui uma mina de menor porte e utiliza parte do minério extraído em Barro Alto. A presença dessas mineradoras têm impulsionado o desenvolvimento econômico da região, gerando empregos significativos, como os 560 empregos em Niquelândia e os 800 postos de trabalho criados em Barro Alto. [1]

Nesse contexto, é evidente a importância da mineração de níquel em Goiás e seu impacto na economia local. No entanto, essa atividade também gera desafios relacionados à gestão ambiental e ao aproveitamento dos subprodutos resultantes do processo de extração. Entre esses subprodutos, destaca-se a escória de ferro-níquel, um resíduo abundante proveniente da separação do minério de níquel da rocha em fornos elétricos trifásicos. A quantidade significativa de escória gerada requer abordagens sustentáveis para sua utilização e minimização dos impactos ambientais associados.

A mineradora *Anglo American* vem fomentando pesquisas como esta a fim de atenuar o problema ambiental. Atualmente essa escória é utilizada para pavimentação de estradas, existem pesquisas para o aproveitamento na fabricação de cimento, também.

A Figura 1 apresenta a deposição da escória de ferro-níquel registrada em 2013, especificamente na central de mineração localizada em Barro-Alto, estado de Goiás. Essa representação visual nos permite ampliar nossa percepção acerca do potencial de ocorrência semelhante em inúmeras outras mineradoras ao redor do mundo.

Figura 1: Depósito de escória ferro-níquel em Barro-Alto (GO)



Fonte: [2]

Diante desse contexto, este estudo tem como objetivo investigar o aproveitamento da escória de ferro-níquel como fluxo no processo de soldagem por arco submerso. Será feita a avaliação de sua viabilidade como um fluxo alternativo no processo de soldagem industrial. O estudo busca contribuir para a busca de soluções mais sustentáveis na indústria da mineração de níquel em Goiás, promovendo a valorização dos subprodutos e a minimização dos impactos ambientais relacionados a essa atividade.

2.Revisão Bibliográfica

Nesta seção são apresentados os conceitos fundamentais para o entendimento de todo o trabalho. Inicialmente, discutiu-se as características da soldagem, com ênfase no processo MIG/MAG e no processo de arco submerso. Em seguida, explorou-se a escória de ferro-níquel como um resíduo gerado na separação do minério de níquel, discutindo sua composição e propriedades. Além disso, serão abordados resumidamente os processos de metalografia, como lixamento, polimento e ataque químico, bem como ensaio de dureza.

Essa revisão bibliográfica busca fornecer uma base sólida de conhecimento sobre o tema, permitindo uma compreensão aprofundada do contexto e embasando o desenvolvimento da pesquisa sobre o aproveitamento do substrato da mineração de ferro-níquel na soldagem por arco submerso.

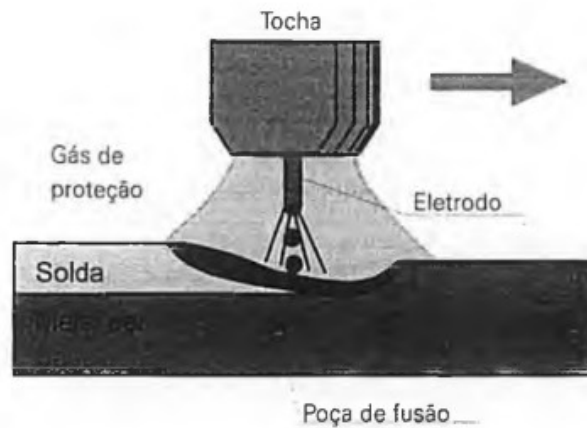
Inicialmente aprofunda-se no conceito de soldagem que é um processo de união de materiais com ou sem adição de um metal de adição. Existem diferentes métodos de soldagem disponíveis, cada um com suas características e aplicabilidades específicas.

2.1. Soldagem do tipo MIG/MAG

A soldagem MIG/MAG, também conhecida como GMAW (Gas Metal Arc Welding), é um processo que utiliza um arco elétrico entre um metal de base e um consumível na forma de arame, conhecido como eletrodo não revestido. Esse arame é alimentado continuamente por uma fonte de alimentação elétrica, e durante a soldagem, o arco elétrico derrete o arame, que serve como material de adição para a junta soldada. [3]

Outra característica da soldagem MIG/MAG é a utilização de um gás de proteção para criar uma atmosfera inerte (MIG) ou ativa (MAG) ao redor do arco elétrico e da poça de fusão. O gás de proteção é fornecido através de um bico de soldagem, que envolve o arame consumível e a região da solda, evitando a contaminação do metal de base com o ar atmosférico, mostrado na Figura 2.

Figura 2: Esquema de soldagem MIG/MAG



Fonte: [4]

No processo MIG, o gás de proteção utilizado é geralmente um gás inerte, como argônio ou uma mistura de argônio com hélio. Esses gases são escolhidos por sua estabilidade química e por não reagirem com o metal fundido durante a soldagem. Essa característica torna o processo MIG adequado para soldar materiais não ferrosos, como alumínio e cobre.

Já no processo MAG, o gás de proteção é uma mistura de gases ativos, como dióxido de carbono (CO_2) ou oxigênio (O_2), puro ou em combinação com argônio. Esses gases ativos reagem com a poça de fusão e podem alterar as propriedades da solda. O processo MAG é geralmente utilizado para a soldagem de aços carbono e aços de baixa liga.

Durante a soldagem MIG/MAG, o arame consumível é alimentado continuamente a uma velocidade controlada através de um alimentador de arame. À medida que o arame é alimentado, ele se funde e é transferido para a poça de fusão, onde contribui para a formação da junta soldada. A corrente elétrica é controlada para garantir a estabilidade do arco e a fusão adequada do arame e do metal de base, assim como o gás de proteção.

2.1.1. Máquina de solda

Existem diferentes tipos de máquinas de solda utilizadas para o processo de soldagem MIG/MAG, sendo uma delas a máquina de solda com tensão constante, também conhecida como máquina de solda CV (Constant Voltage).

A máquina de solda CV é projetada para manter uma tensão de saída constante durante o processo de soldagem. Isso significa que, independentemente das variações na corrente ou na resistência do circuito, a tensão será mantida em um valor fixo. Essa

característica é especialmente importante para a soldagem MIG/MAG, onde a tensão é um parâmetro crítico que influencia a estabilidade do arco elétrico e a fusão adequada do arame e do metal de base.

2.2. Soldagem do tipo arco submerso.

O processo de soldagem por arco submerso é um método de soldagem amplamente utilizado na indústria, caracterizado pela utilização de um arco elétrico formado entre um eletrodo consumível e a peça de trabalho, enquanto a região da solda é coberta por um fluxo granular (parecido com areia) de proteção que funde e forma uma escória líquida, que posteriormente endurece e se destaca do cordão com facilidade.

Durante a realização da soldagem por arco submerso, emprega-se um eletrodo consumível, composto por um arame contínuo, cuja alimentação é automatizada e realizada por um alimentador de arame eletromecânico.

O fluxo granular, que pode ser composto por uma combinação de minerais, é adicionado sobre a região de soldagem para proteger o arco elétrico e a poça de fusão da contaminação atmosférica.

O processo de soldagem por arco submerso oferece diversas vantagens. Devido à cobertura do arco e da poça de fusão com o fluxo granular, há uma proteção efetiva contra a contaminação atmosférica, resultando em soldas de alta qualidade e baixos níveis de defeitos, como porosidade e inclusões. Além disso, a utilização de um fluxo granular permite uma maior eficiência térmica, proporcionando uma maior penetração e taxa de deposição de material. Com um bônus na redução de EPI durante o processo, com o arco submerso não é necessário óculos de proteção para o operador, pois a luminosidade do arco é contida pelo fluxo.

Esse processo é especialmente adequado para a soldagem de materiais de espessuras maiores, uma vez que a proteção do arco elétrico e a contenção do fluxo granular permitem uma maior estabilidade durante a operação. A soldagem por arco submerso também é conhecida por sua capacidade de realizar soldas na posição plana, e oferecendo uma maior produtividade em comparação com outros processos.

No entanto, esse tipo de soldagem também apresenta algumas limitações. Devido à necessidade de um equipamento específico, como uma unidade de alimentação de arame e

uma fonte de energia adequada, esse processo pode exigir um investimento inicial significativo. Além disso, a soldagem por arco submerso é mais adequada para aplicações de soldagem em grandes estruturas e chapas, e pode não ser tão versátil para soldagem em peças de geometria complexa ou em posições de difícil acesso.

Os processos de soldagem MIG/MAG (Soldagem a Gás de Metal Inerte/Ativo) e arco submerso compartilham algumas semelhanças fundamentais. Ambos utilizam um arco elétrico entre um eletrodo consumível e o material de base para fundir e unir os metais. Em ambas as técnicas, o eletrodo atua como uma fonte de material de adição para o cordão de solda. Além disso, ambas as soldagens são realizadas sob uma atmosfera protetora, seja por meio de um gás inerte (MIG) ou gás ativo (MAG) na soldagem MIG/MAG, ou pelo próprio fluxo de escória que cobre o arco na soldagem por arco submerso.

2.3. Parâmetros de solda para MIG/MAG convencional e Arco submerso.

Os parâmetros de soldagem são variáveis controláveis que afetam diretamente o processo de união dos materiais e a qualidade da solda. Eles incluem a velocidade de avanço, a corrente elétrica, a tensão, a taxa de alimentação do arame, a distância entre o bico de contato e peça, entre outros. Cada parâmetro tem um papel crucial na determinação das características da solda, como penetração, geometria do cordão, resistência mecânica, entre outras propriedades. [5]

→ **Velocidade de avanço:** A velocidade de avanço é a velocidade de deslocamento do bico da tocha de soldagem durante o processo. Ela afeta diretamente a taxa de deposição do metal de adição e a velocidade de execução da solda. Uma velocidade de avanço muito alta pode resultar em falta de fusão e penetração insuficiente, enquanto uma velocidade muito baixa pode causar excesso de fusão e problemas de qualidade.

[5]

→ **Corrente elétrica:** A corrente elétrica é a quantidade de energia elétrica aplicada à soldagem, influenciando diretamente a temperatura do arco elétrico. Ajustar a corrente corretamente é essencial para controlar a quantidade de calor fornecida à junta, garantindo a fusão adequada e evitando problemas de superaquecimento ou subaquecimento. Valores mais altos de corrente podem proporcionar maior taxa de fusão, enquanto valores mais baixos podem ser utilizados para soldas mais finas e detalhadas. [5]

- **Tensão:** A tensão é a diferença de potencial entre o eletrodo e a peça, afetando a estabilidade e o comprimento do arco elétrico. Valores mais altos de tensão podem gerar um arco mais longo e estável, enquanto tensões baixas podem causar instabilidades no arco e problemas de penetração. Ajustar a tensão corretamente é importante para obter um arco controlado e uma geometria adequada do cordão de solda. [5]
- **Taxa de alimentação do arame:** A taxa de alimentação do arame está relacionada à velocidade com que o arame de solda é alimentado para a junta durante a soldagem. Essa taxa influencia diretamente a quantidade de material de adição depositado, afetando a largura e a altura do cordão de solda. Geralmente esse valor é ajustado automaticamente pelo alimentador. [5]
- **Distância entre o bico de contato e peça:** A distância entre o bico de soldagem e a peça, é a distância entre o final do bico de contato do arame e a superfície da peça. Essa distância afeta o comprimento e a estabilidade do arco elétrico, bem como a transferência de metal do arame para a peça. [5]

2.4. Escória ferro-níquel

A escória de ferro-níquel é um resíduo gerado durante o processo de separação do minério de níquel da rocha, realizado em fornos elétricos trifásicos. Essa escória é formada principalmente por elementos não metálicos, como SiO_2 (dióxido de silício) e MgO (óxido de magnésio), e pode conter outros compostos indesejáveis em menor proporção. Sua composição varia de acordo com as condições do processo de separação e as características do minério utilizado. (Tabela 1)

Tabela 1: Composição da Escória Ferro-níquel

Composição da Escória ferroníquel Bruta		
Silício	43,60	%
Magnésio	0,36	%
Alumínio	3,90	%
Ferro	14,90	%
Cromo	1,30	%
Níquel	0,14	%
Titânio	0,15	%
Manganês	0,34	%
Nióbio	5	ppm
Cobre	106	ppm
Vanádio	184	ppm
Zircônio	27	ppm
Cobalto	66	ppm

Fonte: [6]

Devido à sua origem como subproduto da indústria de ferro-níquel, a escória é normalmente encontrada em grandes quantidades nas áreas de mineração e metalurgia. Sua disposição inadequada pode acarretar problemas ambientais, como a contaminação do solo e água. Por isso, a busca por formas de aproveitamento e reciclagem desse resíduo tem ganhado atenção crescente em estudos e pesquisas.

A escória possui propriedades que a tornam um material potencialmente útil em diversas aplicações industriais. Ela apresenta características de reatividade e capacidade desoxidante, tornando-a uma possível opção como fluxo em processos de soldagem, como o arco submerso. A sua utilização como fluxo pode beneficiar o processo de soldagem, promovendo melhorias na qualidade do cordão de solda e proteção do metal de base contra contaminação atmosférica.

Além disso, o substrato também tem sido estudado como um componente para a produção de materiais de construção, como telhas cerâmicas e concretos. Nesses estudos, verifica-se a melhora das propriedades mecânicas e térmicas dos materiais com a incorporação da escória, reduzindo também o impacto ambiental associado ao descarte do resíduo.

No contexto desta pesquisa sobre o aproveitamento do substrato da mineração de ferro-níquel como fluxo no processo de soldagem por arco submerso, a escória desempenha um papel central, uma vez que sua aplicação como fluxo pode oferecer uma solução sustentável para o gerenciamento desse resíduo industrial.

2.5. Metalografia e seus processos

A metalografia é uma disciplina fundamental no estudo das propriedades e estruturas dos materiais metálicos. Trata-se de uma técnica de análise microscópica que permite examinar e caracterizar a microestrutura dos metais e ligas, revelando informações valiosas sobre suas propriedades mecânicas, térmicas e químicas. Através da metalografia, é possível compreender a organização dos grãos, a distribuição de fases, as inclusões e imperfeições presentes no material, bem como as interações entre os diferentes componentes da liga. [4]

Para realizar a metalografia, a amostra do material é preparada cuidadosamente, passando por uma série de etapas de corte, embutimento, lixamento e polimento. Em seguida, a amostra é atacada quimicamente com reagentes específicos, que reagem de maneira diferenciada com os diferentes constituintes do material. Esses ataques químicos revelam as estruturas microscópicas do material, que são então analisadas com o auxílio de microscópios ópticos e eletrônicos.

A metalografia desempenha um papel fundamental em diversas áreas da indústria e da pesquisa científica, contribuindo para o desenvolvimento de novos materiais, o controle de qualidade de produtos e a investigação de falhas e problemas em componentes metálicos. É uma ferramenta poderosa para entender a relação entre a estrutura e as propriedades dos metais, possibilitando avanços significativos no campo da engenharia de materiais e na melhoria de processos de fabricação.

2.5.1. Lixamento e polimento

Os processos de lixamento e polimento são etapas essenciais no preparo de amostras para a análise metalográfica. Ambos têm como objetivo obter uma superfície lisa e plana, permitindo a visualização clara das estruturas microscópicas dos materiais metálicos.

O lixamento é o primeiro passo e consiste em utilizar lixas abrasivas de granulometrias variadas para remover as irregularidades e as camadas superficiais do material. Esse processo é realizado de forma gradual, começando com uma lixa mais grossa e

progredindo para lixas mais finas, até que a superfície da amostra fique homogênea e sem arranhões. O lixamento é importante para eliminar imperfeições, como marcas de corte, e proporcionar uma superfície adequada para o polimento posterior.

O polimento é a etapa seguinte, utilizando pastas abrasivas com partículas finas ou suspensões de diamante para obter uma superfície ainda mais lisa e brilhante. Esse processo visa eliminar os riscos deixados pelo lixamento e proporcionar uma superfície espelhada que facilite a visualização das estruturas microscópicas.

2.5.2. Ensaios de dureza Vickers

Os ensaios de dureza são métodos utilizados para avaliar a resistência de um material à penetração de um indentedor padronizado. Um dos ensaios de dureza mais comuns é o ensaio de dureza Vickers, que utiliza um indentedor de diamante com formato de pirâmide de base quadrada. Esse ensaio é amplamente empregado na análise metalográfica, pois fornece informações precisas sobre a dureza dos materiais.

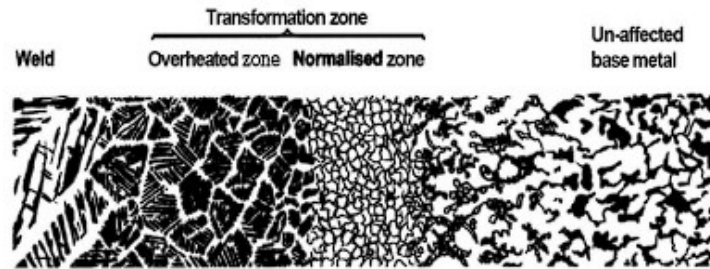
No ensaio de dureza Vickers, uma carga é aplicada ao indentedor, que penetra na superfície da amostra. Após a remoção da carga, a impressão deixada pelo indentedor é medida e a dureza é calculada utilizando a fórmula: “ $HV = 1,854 * F / d^2$ ”, onde F é a carga aplicada e d é a média entre as diagonais impressas na peça pelo indentedor. A dureza Vickers é expressa em unidades de HV (Vickers Hardness). [7]

É importante notar que a dureza Vickers é uma medida adimensional, ou seja, não possui uma unidade específica. A magnitude da dureza Vickers é determinada pela relação entre a carga aplicada e a área da impressão, e valores mais altos de HV indicam uma maior resistência do material à penetração do indentedor, ou seja, maior dureza. Essa escala de dureza é amplamente utilizada em ensaios de materiais metálicos devido à sua precisão e facilidade de realização.

2.5.3. Contorno de grãos e zona termicamente afetada

O contorno de grão é uma característica essencial na microestrutura dos materiais metálicos, e sua análise assume uma importância significativa em soldas. Os grãos representam pequenos cristais que compõem a estrutura do material e são delimitados pelos contornos de grão. Cada grão possui uma orientação cristalográfica única, e a qualidade do contorno de grão pode ser influenciada pelo processo de soldagem. (Figura 3)

Figura 3: Contorno de grão na ZTA.



Fonte: [8]

Durante a soldagem, a zona termicamente afetada (ZTA) experimenta altas temperaturas e ciclos térmicos, o que pode causar recristalização e crescimento de grãos. Isso pode levar a mudanças na microestrutura, como a formação de grãos maiores ou uma distribuição irregular de grãos ao longo da solda. Essas alterações no contorno de grão podem afetar diretamente as propriedades mecânicas e a resistência da junta soldada.

Uma análise detalhada do contorno de grão em soldas é fundamental para garantir a qualidade e a integridade da união. Através de técnicas de microscopia, como a microscopia óptica e eletrônica, é possível examinar o contorno de grão e identificar possíveis imperfeições, como grãos desalinhados, inclusões ou trincas. Essa análise é essencial para entender como as condições de soldagem afetam a microestrutura do material e, conseqüentemente, as propriedades mecânicas da junta soldada.

Além disso, o conhecimento do contorno de grão em soldas pode auxiliar na escolha adequada dos parâmetros de soldagem e na seleção de materiais para obter soldas mais resistentes e confiáveis. A análise do contorno de grão também pode ser usada para avaliar a integridade de soldas em componentes estruturais, garantindo sua segurança e durabilidade.

3. Materiais e Métodos

A presente seção descreve detalhadamente o processo experimental realizado neste estudo em colaboração com a mineradora Anglo American, que forneceu uma quantidade específica de escória de ferro-níquel para fins de pesquisa.

O projeto teve início a partir da proposta do Prof^o Dr. Kléber Mendes de Figueiredo, que visava utilizar a escória como fluxo para soldagem por arco submerso, incorporando carbono à composição da escória com o objetivo de aumentar sua dureza durante o processo de soldagem.

Com base nessa abordagem, um roteiro de pesquisa foi definido da seguinte forma:

1. Adaptação da máquina de solda MIG/MAG para arco submerso.
2. Teste e ajuste dos parâmetros de soldagem.
3. Realização de testes com adição de carbono.
4. Ensaio de dureza e metalografia.

3.1. Adaptação da máquina de solda MIG/MAG para arco submerso.

Foi desenvolvido um suporte para a tocha de soldagem vertical em um software de modelagem 3D e impresso em filamento PLA, sendo que partes metálicas foram utilizadas para a construção do funil e do direcionamento do fluxo de soldagem para a peça, por conta de altas temperaturas próximas ao bico de solda (Figura 4).

Figura 4: Suporte para MIG/MAG para Arco Submerso



Fonte: Próprio autor

O suporte desempenha a função de deposição do fluxo de solda onde ele tem um cilindro que consegue armazenar fluxo suficiente para as amostras estudadas nesta pesquisa. Para o caso da indústria esse suporte deve ser substituído por um alimentador constante com maior capacidade de armazenamento.

Sobre a sua composição, o suporte parte principalmente do cilindro de armazenamento, o funil inclinado que direciona o fluxo para o bico de solda de forma que no momento de soldagem o bico fique sempre envolto de fluxo, mesmo com a velocidade de avanço mais elevada. Isso se dá pelo fato do fluxo ser despejado por gravidade, que ajusta a vazão de acordo com a velocidade de avanço da máquina de controle de avanço do tipo tartaruga.

Essa tartaruga utilizada foi adaptada da tartaruga de oxicorte semi-automática da fabricante: *Soldas Brasil*, modelo: *SBI - 30* que estava disponível no laboratório. Com esse equipamento foi possível regular com maior precisão o posicionamento da tocha de soldagem, bem como a velocidade de avanço do conjunto (Figura 5).

Figura 5: Máquina de corte semi-automática (Tartaruga)



Fonte: [9]

3.2. Teste e ajuste dos parâmetros de soldagem.

Utilizando o aparato montado, realizou-se diversos testes de ajustes de parâmetros de solda, variando velocidade de avanço, tensão de soldagem e granulometria do fluxo, a fim de obter um resultado satisfatório.

Após o primeiro resultado bem sucedido foi possível definir os parâmetros de solda ideais para o experimento, apresentados na Tabela 2.

Tabela 2: Parâmetros de solda

Parâmetros de solda	
Voltagem	30 V
Amperagem	175 A
Velocidade de avanço	~225 mm/min
Distancia de contato bico-peça	15 mm
Arame solido	Ø 1 mm

Fonte: Próprio autor

A máquina de solda utilizada funciona com o princípio de tensão constante, assim ajusta-se a tensão para 30 volts e observa-se pequenas variações de corrente em torno de 175 amperes, lidas no visor da máquina. (Figura 6)

Figura 6: Máquina de solda SUMIG Eagle 405.



Fonte: [10]

Para além dos valores de tensão e corrente, a tartaruga utilizada possui 10 níveis de velocidade, onde a partir dos testes definiu-se como ideal a velocidade de número 3, equivalente a 225 milímetros por minuto.

A distância de contato entre o bico de solda da tocha e a peça foi definida em 15 milímetros, como sugestão do orientador e se mostrou um bom parâmetro trazendo estabilidade satisfatória para o cordão de solda..

O arame de solda utilizado foi o arame MIG AWS ER 70s6 com diâmetro de 1 milímetro. Esse costuma ser o arame de solda mais utilizado na indústria para soldagem de costuras e revestimento tubular, salvo casos específicos de cada indústria.

3.3. Realização de testes com adição de carbono.

Nesta etapa, realizou-se a adição de carbono ao fluxo composto, até então, apenas pela escória ferro-níquel. O carbono em pó foi utilizado para essa incorporação, com o intuito de aumentar a dureza do cordão de solda durante o processo de soldagem.

Para os testes iniciais, foram preparadas diferentes misturas utilizando um recipiente plástico contendo 500 gramas de escória ferro-níquel. A adição de carbono em pó foi realizada em porcentagens diferentes com relação ao peso total da mistura. Foram utilizados 75 gramas, 50 gramas e 25 gramas de carbono em pó, representando 15%, 10% e 5% de carbono, respectivamente. A incorporação do carbono foi cuidadosamente realizada no próprio recipiente, a fim de homogeneizar a mistura. Todas essas misturas foram realizadas utilizando uma balança de precisão de 0,1 grama.

A adição de carbono à composição do fluxo de soldagem pode promover reações com os elementos presentes no metal de base durante o processo de soldagem, culminando na formação de microestruturas moleculares contendo átomos de carbono. Essas estruturas, resultantes da incorporação do carbono, desempenham um papel crucial no aumento da dureza do material depositado e conseqüentemente, aumento da dureza do revestimento resultante.

3.4. Ensaios de dureza e metalografia.

Nesse momento realizou-se a retirada de uma amostra para testes de dureza e verificação de grãos no microscópio eletrônico. Essa retirada ocorreu por meio do corte com disco de abrasão em baixa rotação e refrigeração com fluido refrigerante para não gerar interferência térmica no interior da peça. (Figura 7)

Figura 7: Máquina de corte por disco de abrasão Fortel CF 3.



Fonte: Próprio autor

Após o corte da amostra, o próximo passo foi o de realizar o embutimento com baquelite para se obter maior manuseabilidade da amostra durante os processos de lixamento e ensaios de dureza. (Figura 8)

Figura 8: Máquina de embutimento EFD 30.



Fonte: Próprio autor

Com a amostra cortada e embutida, o próximo passo foi o de iniciar o lixamento e polimento da amostra. Iniciou-se o lixamento com lixas de maior granulometria e gradualmente trocam-se as lixas até a de menor granulação utilizando uma politriz (Figura 9). Neste experimento foi executado o lixamento na seguinte sequência:

1. Lixa d'água 220
2. Lixa d'água 320
3. Lixa d'água 500
4. Lixa d'água 600
5. Lixa d'água 1200
6. Lixa d'água 2000

Sempre que altera a granulometria da lixa rotaciona-se a peça em 90° a fim de garantir que a lixa mais fina elimine todos os riscos da lixa anterior.

Figura 9: Politriz PLF Fortel - lixamento e polimento.



Fonte: Próprio autor

Com a peça finalizada todas as etapas do lixamento inicia-se o polimento da amostra. Neste experimento foi realizado polimento com líquido de alumina em suspensão com 1 micrômetro de granulometria.

Nesse momento a peça é polida até retirar todos os riscos da lixa 2000, depois com a amostra completamente polida o próximo passo é realizar o ataque químico para revelação dos da microestrutura.

Neste experimento foi realizado ataque químico com cloreto férrico esfregando por 45 segundos exposto ao reagente, limpando a peça com água destilada e utilizando algodão para secar a amostra.

Com a peça completamente seca colheu-se as imagens do microscópio óptico e realizou-se os testes de dureza. As imagens foram retiradas utilizando microscópio ZEISS AX10 fornecido pelo laboratório de metalografia e microscopia na universidade. (Figura 10)

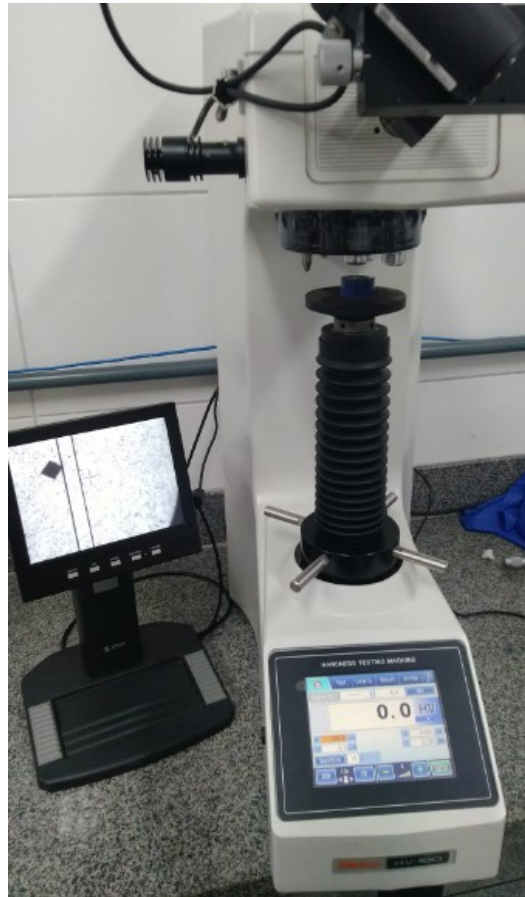
Figura 10: Microscópio óptico ZEISS AXIO Imager M2m.



Fonte: Próprio autor

Para os testes de dureza foi usado o durômetro Mitutoyo hv 100 com aplicação de um quilograma-força (kgf) por 15 segundos a fim de obter dureza vicker HV1. Parâmetro que se mostrou eficiente mediante aos valores que estavam sendo encontrado, com baixa flutuação entre eles.(Figura 11)

Figura 11: Durômetro Mitutoyo hv 100



Fonte: próprio autor

Para obtenção da dureza das amostras foram realizados 9 ensaios em cada amostra, sendo 3 deles na região da solda, 3 deles na zona termicamente afetada, e 3 deles no metal de base. Assim diminui-se a flutuação de valores e obtém-se um valor médio mais confiável e condizente com a realidade. Essa quantidade de valores em cada região se mostrou efetiva por conta da baixa flutuação entre os valores que foi-se obtendo durante os ensaios.

4.Resultados

Os resultados dessa pesquisa serão apresentados seguindo um roteiro diferente do cronológico de forma que faça mais sentido com a sequência lógica da análise dos dados.

Roteiro:

1. Parâmetros de solda
2. Amostra 0 - cordão de solda sem penetração
3. Amostra 1 - cordão de solda MIG-MAG utilizando CO₂ puro
4. Amostra 2 - Arco submerso.
5. Amostra 3 - Arco submerso sem retirar carepa de laminação.
6. Amostra 4 - Arco submerso 1% de carbono.
7. Comparação dos resultados.

4.1. Parâmetros de solda.

Durante os primeiros momentos da pesquisa foi dedicado algumas amostras para os ajustes dos parâmetros de solda (Figura 12).

Figura 12: Amostras para ajuste de parâmetros de solda



Fonte: próprio autor

Durante esses primeiros ensaios, assim que o cordão de solda ficou completamente contínuo, sem poros e bolhas, retirou-se uma pequena amostra para realizar ensaios de dureza e metalografia a fim de avaliar a qualidade e profundidade da solda.

Sem obter bons resultados, a tentativa foi realizar maior controle da granulometria da escória ferro-níquel. Diante das limitações de recursos para uma peneiração de granulometria controlada, optou-se por submeter o substrato a uma peneira de obras, permitindo a remoção dos fragmentos maiores e a obtenção de uma escória um pouco mais refinada, com distribuição de tamanho mais uniforme.

Com isso retorna-se os testes de parâmetros até que por fim chega-se aos parâmetros ideais de tensão, distância de contato bico-peça e velocidade de avanço, obtendo um cordão de solda uniforme e muito próximo dos cordões de solda por arco submerso encontrados na literatura (Figura 13).

Figura 13: Amostra 2 - Cordão de solda de arco submerso e escória de soldadura

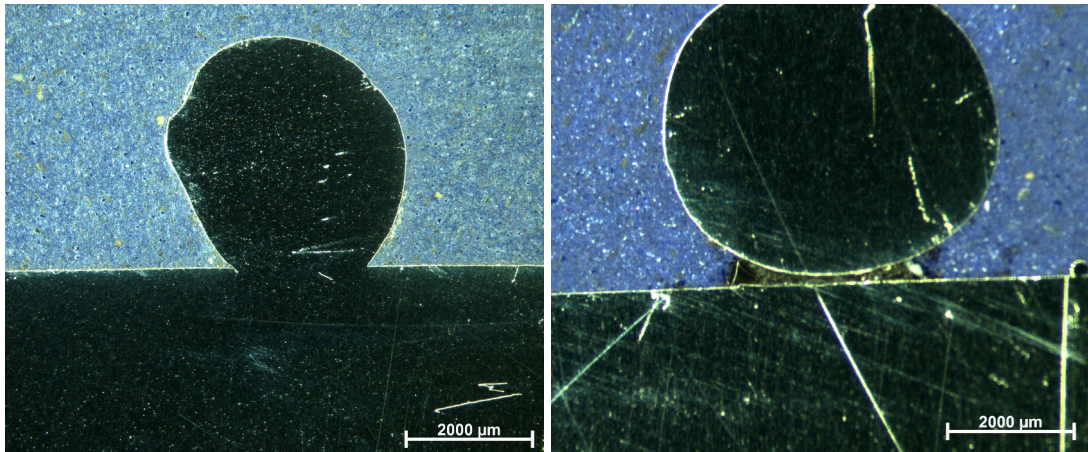


Fonte: próprio autor

4.2. Amostra 0 - cordão de solda sem penetração.

Durante a fase de testes e ajustes de parâmetros de soldagem por arco submerso foi obtido um cordão de solda não uniforme com grandes falhas de descontinuidade por conta da aplicação dos parâmetros de tensão e avanço, ainda, não ideais. A partir dele foi retirada a imagem abaixo que apresenta claramente a falta de adesão do cordão à peça. (Figura 14)

Figura 14: Amostra 0 - Cordão de solda sem penetração.



Fonte: próprio autor

Ainda assim, como em algumas regiões do cordão houve alguma adesão foi decidido fazer os ensaios de dureza. Obtendo para essa amostra as seguintes durezas vickers HV1 para cada região:

- Solda: 246,8 vickers
- ZTA: 145,5 vickers
- Base: 146,8 vickers

Os valores apresentados confirmam a baixa penetração da solda, onde os valores de dureza da zona termicamente afetada (ZTA) é muito próximo da dureza do metal de base.

4.3. Amostra 1 - cordão de solda MIG/MAG utilizando CO₂ puro.

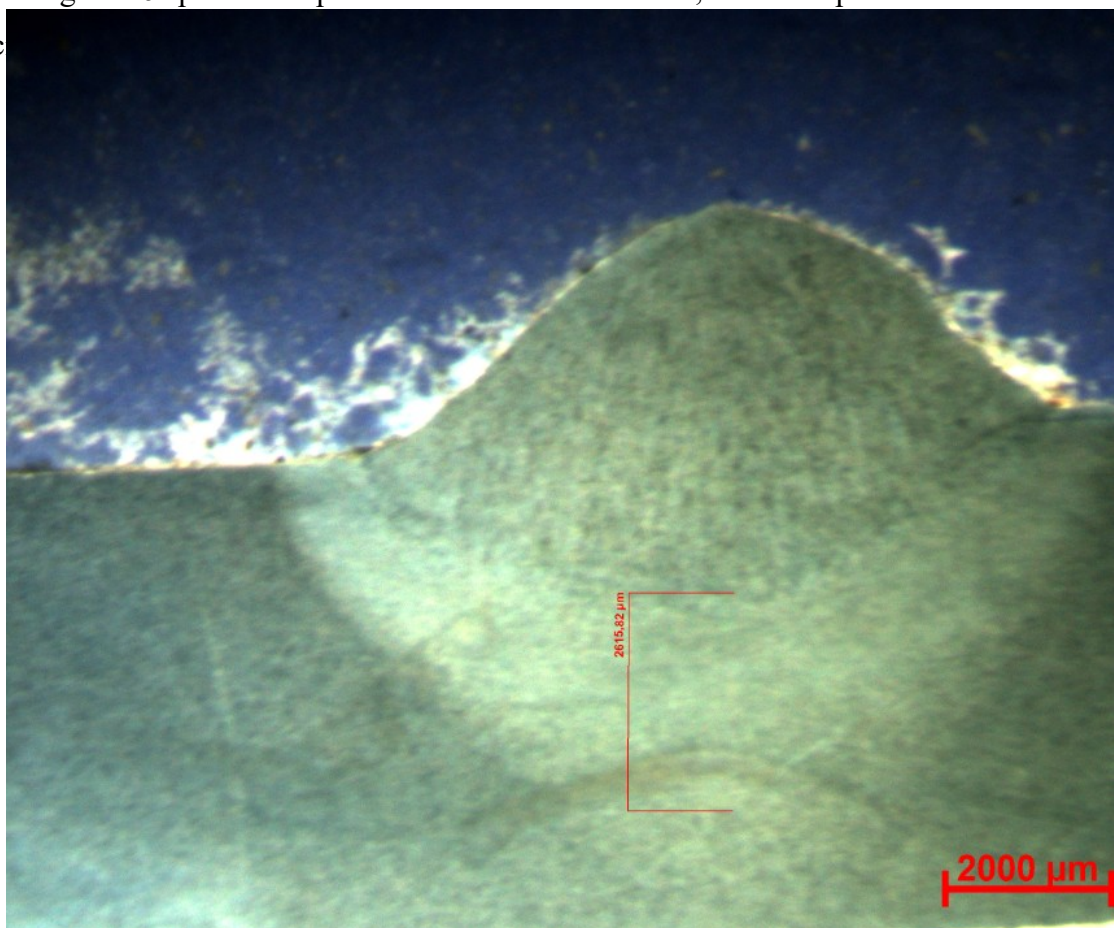
Para fins de comparação de dureza com o experimento de arco submerso e discutir o resultado obtido, realizou-se também um cordão de solda utilizando o processo MIG-MAG padrão, com a presença de gás, onde foi utilizado o dióxido de carbono puro. (Figura 15)

Figura 15: Amostra 1 - Cordão de solda MIG/MAG utilizando CO2 puro.



Fonte: próprio autor

A Figura 16 apresenta o perfil do cordão de solda, onde é possível observar a aderência



Fonte: próprio autor

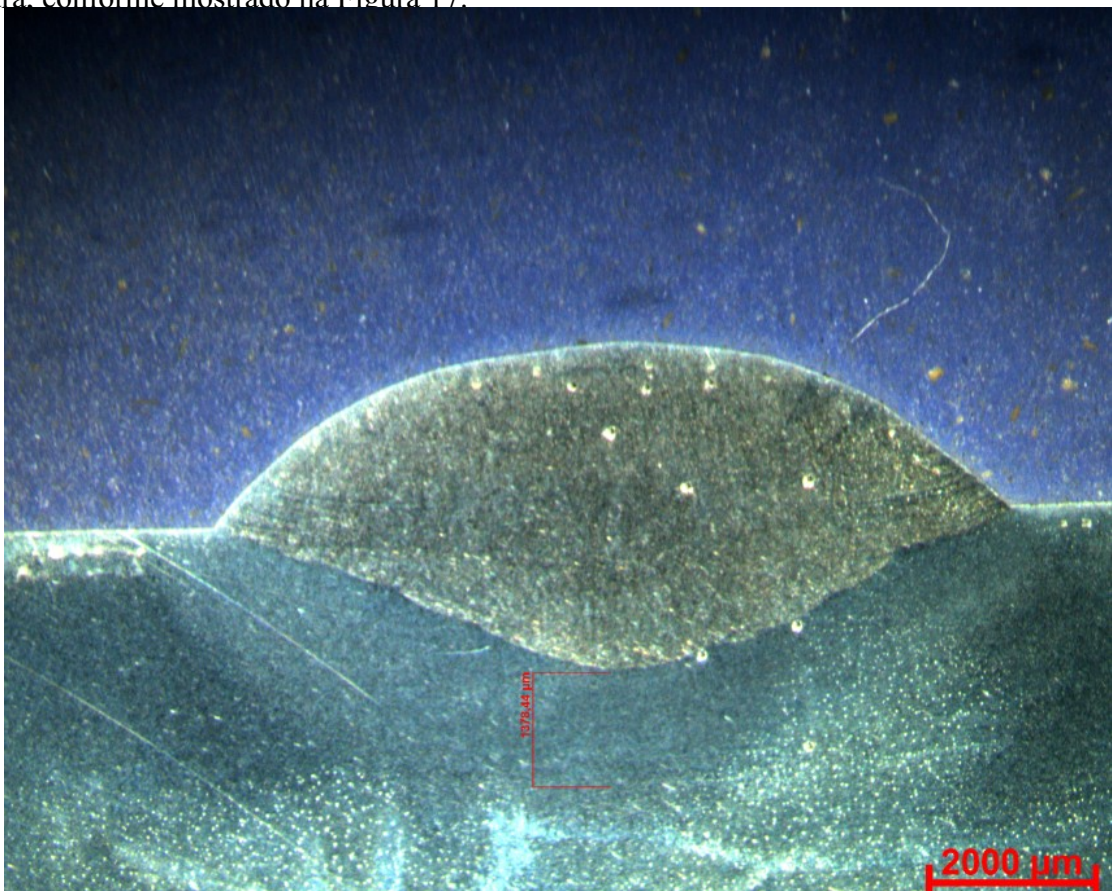
Seguindo com os ensaios de dureza e mantendo o mesmo padrão, pegou-se 3 valores na solda e 3 valores na zona termicamente afetada, a partir da média dos valores em cada região chegou-se ao seguinte resultado de dureza vickers HV1:

- Solda: 175,0 vickers
- ZTA: 161,2 vickers
- Base: 148,6 vickers

Os valores apresentados mostram a melhor distribuição da dureza que diminui conforme se aproxima do metal de base, característico do processo de soldagem MIG/MAG. Esses valores serão usados para comparação com a dureza dos experimentos realizados no processo de arco submerso.

4.4. Amostra 2 - Arco submerso.

O primeiro cordão característico de soldagem por arco submerso, foi obtido após o refinamento do fluxo, e apresenta boa penetração e uma ZTA de aproximadamente 1,3 mm de espessura, conforme mostrado na Figura 17.



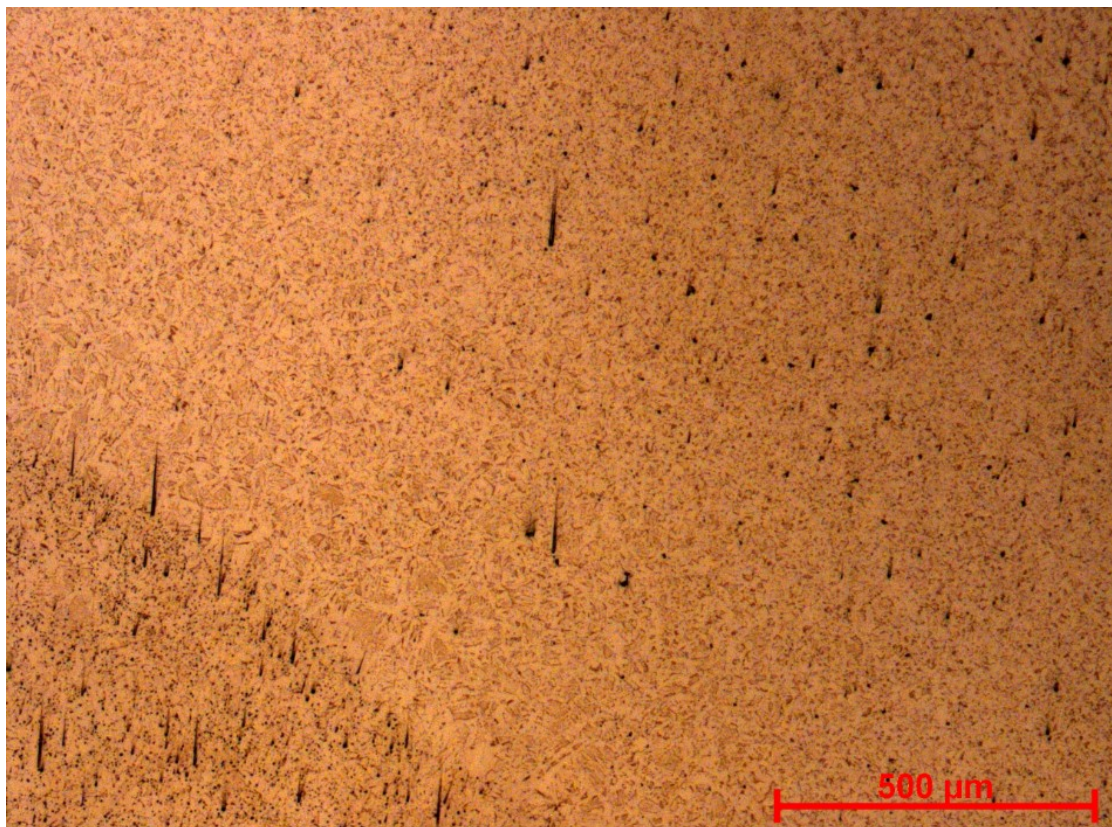
Fonte: próprio autor

Seguindo com os ensaios de dureza vickers HV1 foram obtidos os seguintes resultados para essa amostra:

- Solda: 167,9 vickers
- ZTA: 154,6 vickers
- Base: 147,1 vickers

Os valores apresentados estão bem próximos e ligeiramente menores que os valores da solda MIG/MAG utilizando CO_2 . A fim de um maior entendimento da aderência da solda fez-se uma imagem com maior ampliação (Figura 18).

Figura 18: Amostra 2 - Microestrutura; Arco submerso.



Fonte: próprio autor

Na Figura 18 é possível observar a diferença dos grãos na solda (inferior esquerda) na ZTA e no metal de base (superior direita). Onde vemos um aumento do grão na ZTA, grãos menores próximo ao metal de base caracterizando a zona normalizada, além da divisão clara na solda.

4.5. Amostra 3 - Arco submerso sem retirar carepa de laminação.

Durante todo o experimento, uma possibilidade foi sugerida pelo professor Demóstenes, que observou o experimento em andamento. Surgiu então a proposta de realizar a soldagem sem remover a carepa de laminação, considerando que a escória de ferro-níquel possui silício, que atua como antioxidante.

Essa nova abordagem foi testada em uma nova amostra, demonstrando-se bem-sucedida. Onde o resultado obtido se aproximou muito do cordão de solda característico de arco submerso. (Figura 19)

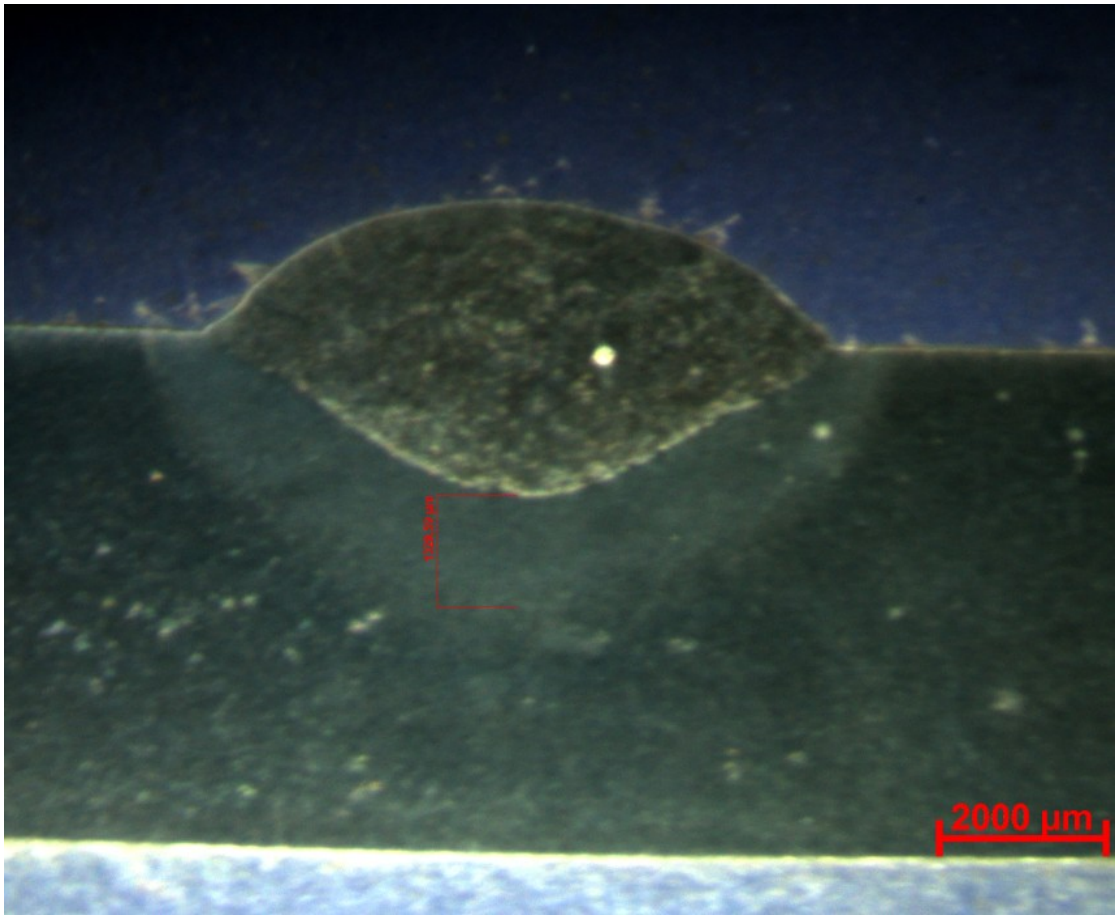
Figura 19: Amostra 3 -Cordão de solda arco submerso sem retirar carepa de laminação.



Fonte: próprio autor

Seguindo com o experimento da soldagem sem retirada da carepa de laminação, nas imagens do microscópio obteve-se um cordão muito próximo da amostra 1, onde a solda apresenta uma boa penetração, característica de soldas de arco submerso com 30 volts de tensão. Além de apresentar uma ZTA de aproximadamente 1,3 mm de espessura, praticamente igual a amostra 2. (Figura 20)

Figura 20: Amostra 3 - ZTA arco submerso sem retirar da carepa.



Fonte: próprio autor

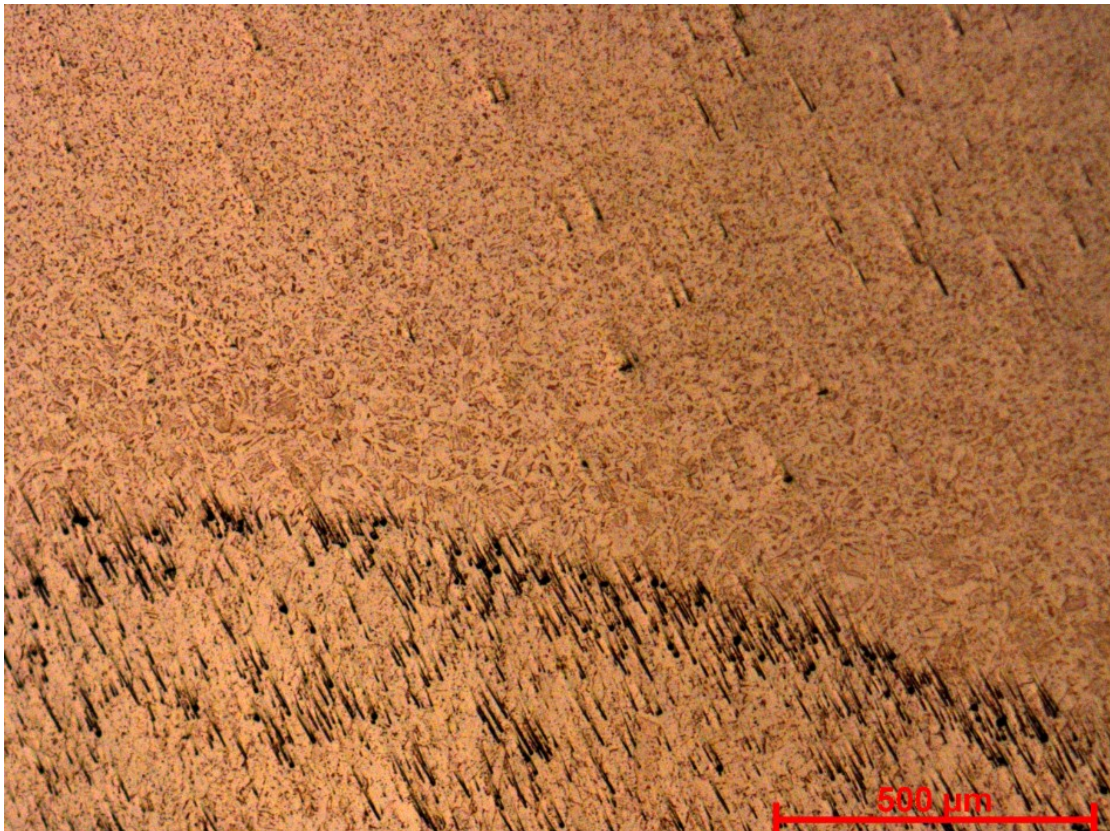
Seguindo com os ensaios de dureza vickers HV1 foram obtidos os seguintes resultados para essa amostra:

- Solda: 149,9 vickers
- ZTA: 152,5 vickers
- Base: 146,4 vickers

Os valores apresentados mostram uma diminuição da dureza em relação ao experimento com a retirada da carepa de laminação onde a dureza da solda se aproxima ainda mais da dureza do metal de base.

Ao analisar o contorno de grão percebe-se que a solda aconteceu de fato seguindo os mesmos padrões da amostra 2. Com a zona do metal de adição bem definida, seguida de grãos maiores caracterizando aumento de temperatura, seguidas de uma zona de grãos menores caracterizando a zona normalizada. Na Figura 21 não é possível identificar a região do metal de base que estaria localizado mais acima do que a ampliação da imagem pôde alcançar.

Figura 21: Amostra 3 - Microestrutura; Arco submerso sem retirar carepa.



Fonte: próprio autor

4.6. Amostra 4 - Arco submerso 1% de carbono.

A fim de aumentar a dureza do revestimento durante o processo de soldagem por arco submerso, realizou-se testes com adição de carvão em pó (Carbono) à composição do fluxo.

Para essa etapa foram idealizados 3 testes com diferentes concentrações de carbono no fluxo, 5%, 10% e 15%. Com o fluxo preparado realizou-se o testes com 5% e 10% de carbono, que não funcionaram. Durante a soldagem ocorreram labaredas de fogo por conta da queima do carvão e o cordão de solda ficou com muitos poros e descontinuidades (Figura 22).

Figura 22: Cordão de solda com 5% e 10% de carbono na composição do fluxo



Fonte: próprio autor

A partir dessa falha foi definido a realização de mais um teste com apenas 1% de carbono na composição do fluxo. Neste caso não houveram grandes problemas e o cordão de solda ficou contínuo e com aparência mais homogênea (Figura 23).

Figura 23: Amostra de solda com 1% de carbono na composição do fluxo

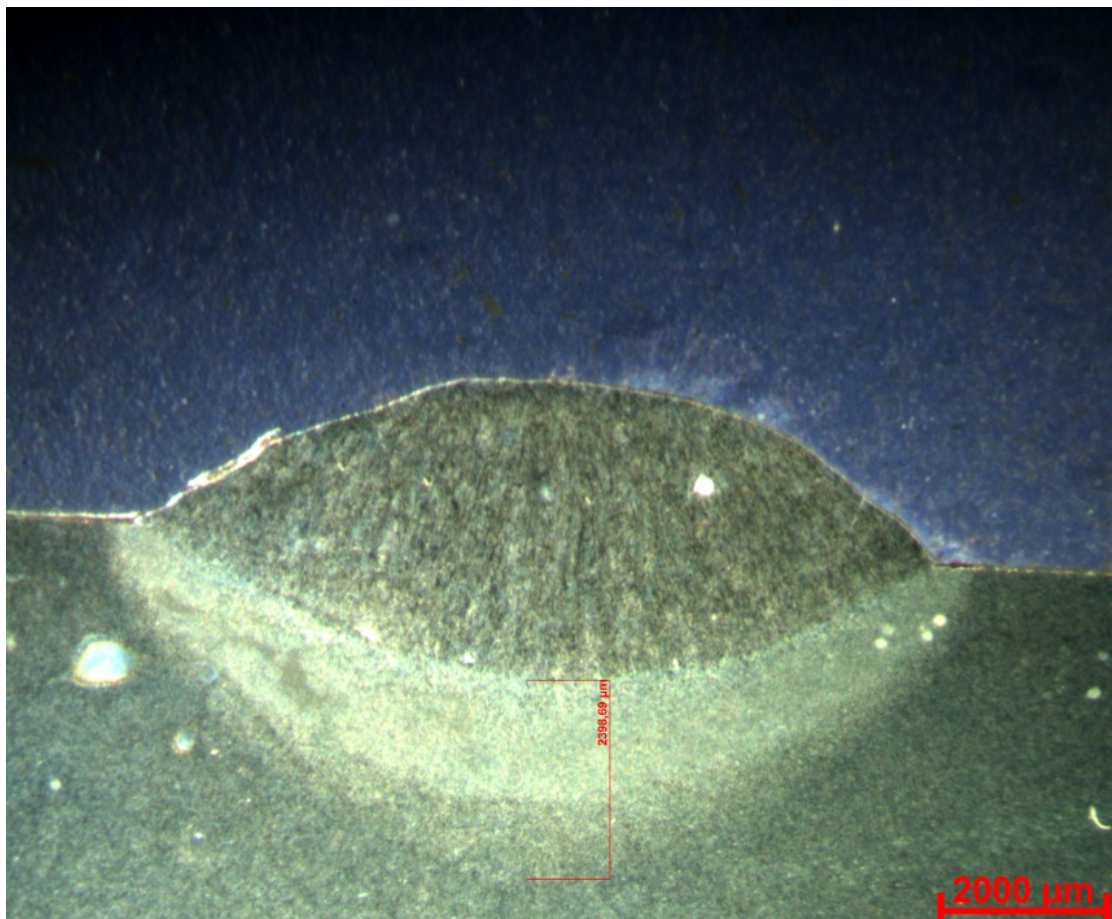


Fonte: próprio autor

Essas pequenas imperfeições podem ser controladas ajustando os parâmetros de soldagem, como por exemplo aumentando a velocidade de avanço ou refinando um pouco mais a granulometria do fluxo. Logo decidiu-se por realizar a metalografia da amostra em sua região mais contínua para verificar o aumento de dureza.

Realizando a metalografia da amostra com adição de 1% de carbono à composição do fluxo de escória ferro-níquel, conseguiu-se observar as mesmas características das amostras anteriores, onde a solda apresenta boa penetração, e zona termicamente afetada de aproximadamente 2,3 mm de espessura. Na Figura 24 identifica-se a ZTA dividida em uma camada mais densa e uma camada de normalização em seguida.

Figura 24: Amostra 4 - ZTA arco submerso com 1% de carbono no fluxo.



Fonte: próprio autor

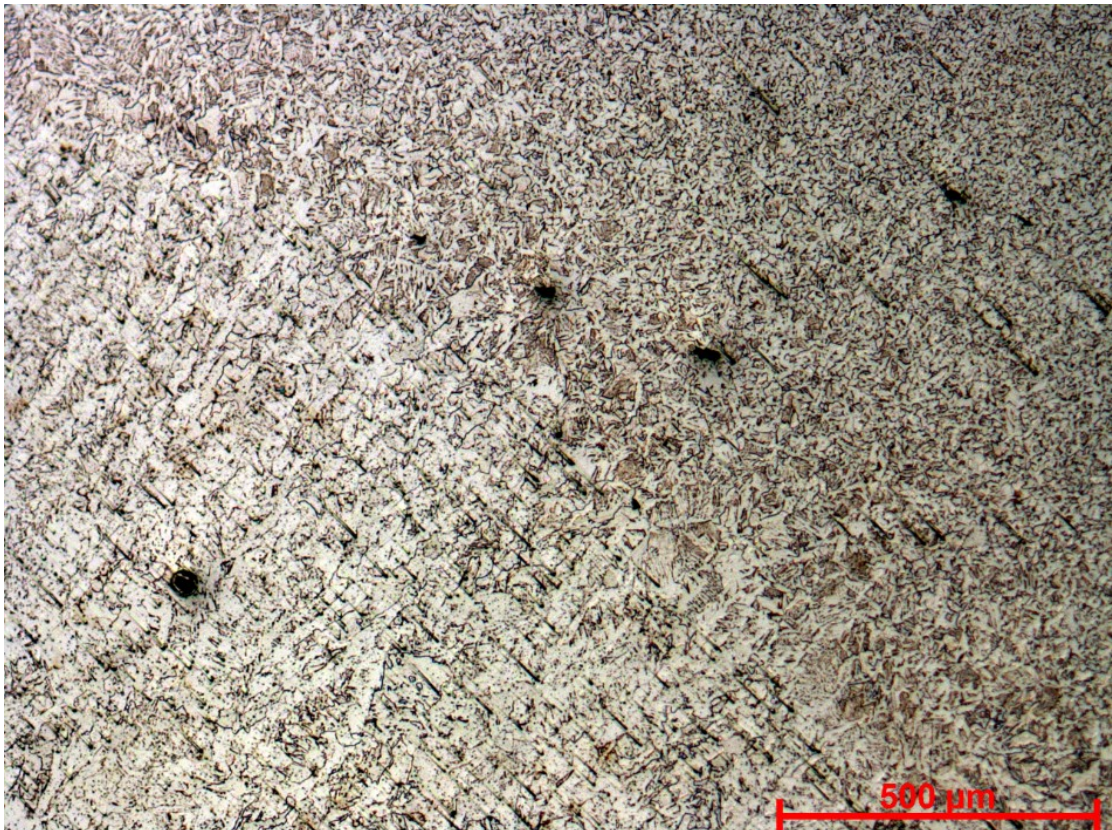
Com os ensaios de dureza vickers HV1 foram obtidos os seguintes resultados para essa amostra:

- Solda: 166,5 vickers
- ZTA: 163,1 vickers
- Base: 144,2 vickers

Os valores apresentados mostram a permanência da dureza próxima do processo MIG/MAG, mas ainda ligeiramente inferior.

Partindo para análise metalográfica esse experimento apresenta uma junção mais suave entre o metal de adição e o restante, mas ainda mantém as características de uma boa solda, onde existem grãos maiores na ZTA e vão diminuindo conforme aumenta a zona de normalização (canto superior direito). (Figura 25)

Figura 25: Amostra 4 - Contorno de grão arco submerso com 1% de carbono.



Fonte: próprio autor

4.7. Comparação dos resultados.

Por fim, reúne-se os dados obtidos nos diversos experimentos na Tabela 3, onde é possível discutir em conjunto e ter maior visibilidade dos dados obtidos nessa pesquisa.

Tabela 3: Dureza Vickers de todas as amostras

Dureza Vickers HV1 (1 kgf por 15 s)						
Amostra	Solda	Desv. Padrão	ZTA	Desv. Padrão	Metal de base	Desv. Padrão
amostra 0 (sem penetração)	246,8	9,4	-	-	146,9	5,0
amostra 1 (mig-mag CO2 puro)	178,3	5,2	161,2	6,5		
amostra 2 (arco-submerso)	167,9	6,3	154,6	3,8		
amostra 3 (arco-submerso com carepa)	149,9	3,9	152,5	6,0		
amostra 4 (1% carbono)	166,5	9,5	163,1	6,5		

Fonte: Próprio autor

Como mostra a Tabela 3, na amostra 0, onde não houve penetração do metal de adição, apresenta valor de dureza elevado indicando o valor de dureza do metal de adição sem diluição com o metal de base na poça de fusão. Uma vez que não houve penetração da solda, logo não houve formação da poça de fusão propriamente dita, implicando em inexistência da ZTA (zona termicamente afetada).

Já os valores das amostras 1, 2 e 4, ficaram muito próximos, levando em conta o desvio padrão, onde se percebe uma ligeira queda de dureza quando utiliza-se a escória como fluxo, sem grandes influências na qualidade do cordão de solda. Além disso, a adição de carbono no fluxo não teve o resultado esperado, uma vez que a dureza da amostra 4 se manteve muito próxima da dureza obtida na amostra 2.

No experimento da amostra 3 (com carepa de laminação) percebe-se uma queda nos valores de dureza, que provavelmente foi resultado da diluição dos óxidos presentes na carepa durante o processo de soldagem.

Por fim as ZTAs (zonas termicamente afetadas) de todas as amostras ficaram muito próximas, levando em consideração o desvio padrão, muito por conta da utilização dos mesmos parâmetros de soldagem, sem grandes variações nos processos, o que inferiu mais ou menos a mesma influência térmica em todas as amostras.

5. Conclusão

Diante dos resultados obtidos, concluiu-se que a utilização do substrato da mineração de ferro-níquel como fluxo no processo de soldagem por arco submerso apresentou ligeira queda na dureza, sem grandes influências no cordão de solda, indicando que o fluxo pode promover maior diluição do metal de adição no metal de base durante a soldagem.

Além disso, os experimentos realizados com adição de 1% de carvão moído na composição do fluxo não se mostraram eficientes no aumento da dureza do cordão, mantendo os valores de dureza próximos das amostras realizadas sem adição de carbono.

Os resultados também mostram que não houve redução significativa de dureza entre os processos de MIG/MAG e arco submerso, comprovando a semelhança entre os dois processos de soldagem.

No experimento em que não houve remoção da carepa de laminação do corpo de prova, observou-se uma diminuição na dureza. Esse efeito pode ser atribuído à possível diluição dos óxidos presentes na carepa durante o processo de soldagem no momento da formação da poça de fusão.

Por fim, essa pesquisa contribui para o desenvolvimento de aplicações industriais sustentáveis, ao explorar a incorporação de resíduos de mineração no contexto do processo de soldagem por arco submerso, amplamente utilizado na indústria.

6.Trabalhos futuros

Como continuação dessa pesquisa fica a sugestão de analisar diferentes granulometrias do fluxo de forma mais controlado, refinando um pouco mais a escória com peneiras de granulometria controlada.

O teste de adição de carbono através de outras fontes, para além do carvão moído, além de testes com pequenos aumentos na porcentagem de carbono misturada ao fluxo.

A realização dos experimentos em uma máquina de arco submerso de fato, sem adaptações, para garantir maior confiabilidade no controle do processo, e maior liberdade nas variações dos parâmetros de soldagem.

7.Referências Bibliográficas

1. Jornal O Popular. Goiás lidera produção de níquel. 2014. Disponível em: <<https://ibram.org.br/noticia/goias-lidera-producao-de-niquel/>>. Acesso em: 24 jul. 2023.
2. SILVA, V. P. Uso de escória de ferro-níquel na fabricação de Pavers. 2019. TCC - Graduação (Graduação em Engenharia Civil) - Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia de Goiás, Goiânia, 2019.
3. ALUMAQ. O que é Solda MIG/MAG?. 2018. Disponível em: <<https://www.alumaq.com.br/o-que-e-solda-mig-mag/>>. Acesso em: 24 jul. 2023.
4. MARQUES, P. V.; MODENESI, P. J.; BRACARENSE, A. Q.. Soldagem - Fundamentos e Tecnologia. 3. Ed.. Belo Horizonte. Editora UFMG. 2005.
5. BELTRÁN, J. H. D.. Influência do metal de adição e do gás de proteção na soldagem MAG de chapas de aço SAE 1020. 2019. Monografia (Graduação em Engenharia Mecânica)- Departamento de Engenharia Mecânica da Escola de Engenharia da Universidade Federal do Rio Grande do Sul, RS, 2019.
6. SANTOS, G. P. P.. Um estudo sobre a utilização da escória de ferroníquel em pavimento rodoviário. 2013. Dissertação (Mestrado em Engenharia de Transporte)- Instituto Militar de Engenharia, Rio de Janeiro, 2013.
7. Grupo CIMM. Teste de dureza Vickers. Disponível em: <https://www.cimm.com.br/portal/material_didatico/6559-teste-de-dureza-vickers>. Acesso em: 24 jul. 2023.
8. PAREDES, Ramon. Introdução à Metalurgia Da Soldagem. 2013. Disponível em: <<http://ftp.demec.ufpr.br/disciplinas/EME733/Arquivos%20da%20disciplina/Introducao%20Metalurgia%20da%20Soldagem.pdf>>. Acesso em: 24 jul. 2023.
9. SOLDAS BRASIL. Máquinas de Oxi-corte SB1-30. 2019. Disponível em: <<https://www.soldasbrasil.com.br/maquinas-oxi-corte-sb1-30.php>>. Acesso em: 24 jul. 2023.
10. SUMIG. Máquina de Soldagem MIG/MAG Eagle 405. Disponível em: <<https://www.sumig.com/pt/produto/detalhe/maquina-de-soldagem-mig-mag-eagle-405>>. Acesso em: 24 jul. 2023.



UNIVERSIDADE FEDERAL DE GOIÁS
ESCOLA DE ENGENHARIA ELÉTRICA, MECÂNICA E DE COMPUTAÇÃO

DECLARAÇÃO

PLANO DE TRABALHO DO PROJETO FINAL DE CURSO

Título do Trabalho

Estudo do uso da escória ferro-níquel no processo de soldagem utilizando o processo MIG/MAG adaptado para arco submerso

Orientador: Kléber Mendes de Figueiredo

Co-orientador: _____

Curso

Engenharia Elétrica ()	Engenharia Mecânica (X)	Engenharia de Computação PFC 1 () PFC 2 ()
-------------------------	-------------------------	--

Dados	Discente 1	Discente 2
Matrícula - Nome	201703940 – Yago Machado	
Telefone	(62) 9 9999 0205	
E-mail	yagomachado16@gmail.com	

Resumo

O projeto consiste em estudar a utilização e interação da escória ferro-níquel proveniente do processamento do minério extraído da mina de Barro Alto, Goiás, da Mineradora Anglo American, no processo de soldagem. Para isso, utilizou um equipamento de soldagem MIG/MAG adaptado para soldagem arco submerso, utilizando a escória como fluxo. Essa escória é gerada no processamento do minério para a extração de níquel, necessitando de área para armazenamento, e cuidados especiais para evitar danos ao meio ambiente.

I. Objetivos.

Os objetivos deste projeto são:

- Estudar a interação da escória ferro-níquel no metal de solda;
- Estudar a influência da escória ferro-níquel na dureza do metal de solda, com o intuito de aumentar a dureza para a utilização na soldagem de revestimento com metal duro;
- Estudar a influência da escória ferro-níquel na microestrutura do metal de solda.

II. Metodologia (atividades a serem desenvolvidas).

A metodologia utilizada neste projeto será:

- Construir um sistema na impressora 3D para adaptar o processo de soldagem MIG/MAG em arco submerso;
- Utilizar o arame eletrodo 70S de 1 mm de diâmetro;
- Realizar cordões de solda sobre chapa utilizando diferentes granulometrias, com e sem adição de carbono;
- Realizar ensaios de dureza;
- Realizar ensaios de metalografia.

III. Resultados Esperados

Espera-se encontrar um bom resultado no uso da escória como fluxo para processo de soldagem arco submerso, com melhoras na propriedade de dureza, podendo chegar a níveis de dureza, para que o processo possa ser utilizado como revestimento de metal duro de baixo custo.

IV. Cronograma de Atividades

Na Tabela 1 é mostrado o Cronograma de Atividades.

Tabela 1 - Semestre letivo 2021/01

Etapas do Projeto	Abril	Maiο	Junho	Julho	Agosto
1 - Pesquisa Bibliográfica	XXXXXX	XXXXXX			
2 - Desenvolvimento	XXXXXX	XXXXXX	XXXXXX	XXXXXX	
3 - Análise dos resultados			XXXXXX	XXXXXX	
4 - Elaboraco da Monografia ou Artigo conforme o caso			XXXXXX	XXXXXX	XXXXXX
5 - Apresentaco do Projeto Final					XXXXXX
6 -					
7 -					
8 -					
9 -					



Documento assinado eletronicamente por **Kléber Mendes De Figueiredo, Professor do Magistério Superior**, em 27/04/2023, às 11:19, conforme horário oficial de Brasília, com fundamento no § 3 do art. 4 do [Decreto n 10.543, de 13 de novembro de 2020](#).



Documento assinado eletronicamente por **Yago De Moraes Machado, Discente**, em 27/04/2023, às 11:41, conforme horário oficial de Brasília, com fundamento no § 3 do art. 4 do [Decreto n 10.543, de 13 de novembro de 2020](#).



A autenticidade deste documento pode ser conferida no site https://sei.ufg.br/sei/controlador_externo.php?acao=documento_conferir&id_orgao_acesso_externo=0, informando o código verificador **3704802** e o código CRC **AD44DB22**.