



**CENTRO FEDERAL DE EDUCAÇÃO TECNOLÓGICA DE MINAS GERAIS
CAMPUS TIMÓTEO**

THALES HARVEY CRISÓSTOMO BARROS

**DESENVOLVIMENTO DE ARAMES TUBULARES COM INGREDIENTE DE FLUXO
INOVADOR EM ESCALA LABORATORIAL**

Timóteo

2024

THALES HARVEY CRISÓSTOMO BARROS

**DESENVOLVIMENTO DE ARAMES TUBULARES COM INGREDIENTE DE FLUXO
INOVADOR EM ESCALA LABORATORIAL**

Monografia apresentada no curso de Graduação em Engenharia Metalúrgica do Centro Federal de Educação Tecnológica de Minas Gerais como requisito parcial para obtenção do título de Bacharel em Engenharia Metalúrgica.

Orientador: Dr. Erriston Campos Amaral

TIMÓTEO

2024

FOLHA DE APROVAÇÃO

THALES HARVEY CRISÓSTOMO BARROS

DESENVOLVIMENTO DE ARAMES TUBULARES COM INGREDIENTE DE FLUXO INOVADOR EM ESCALA LABORATORIAL

Monografia apresentada no curso de Graduação em Engenharia Metalúrgica do Centro Federal de Educação Tecnológica de Minas Gerais como requisito parcial para obtenção do título de Bacharel em Engenharia Metalúrgica.

Aprovado em 09 Setembro de 2024.



Prof. Dr. Erriston Campos Amaral

Centro Federal de Educação Tecnológica de Minas Gerais - Campus Timóteo



Prof. Dr. Almir Silva Neto

Centro Federal de Educação Tecnológica de Minas Gerais - Campus Timóteo



Prof. Dr. Valmir Dias Luiz

Centro Federal de Educação Tecnológica de Minas Gerais - Campus Timóteo

Dedico aos meus pais e amigos que me auxiliaram durante o processo de construção deste trabalho.

AGRADECIMENTOS

Primeiramente, agradeço à minha família, especialmente aos meus pais, Harvey Ramon Hipócrates Damasceno Barros e Alba Crisóstomo do Carmo Barros, que me apoiaram incondicionalmente durante todos esses anos, investindo na minha educação. Sem eles, não seria possível vencer o desafio da graduação. Agradeço também à minha irmã, Sophia Barros, por ser parte fundamental da minha trajetória.

À minha namorada, Marina Morais, pela paciência e compreensão, por sempre me manter motivado e me fortalecer nos momentos de aflição.

Ao meu orientador, Professor Erriston Campos Amaral, pela disponibilidade e paciência em transmitir ensinamentos ao longo da elaboração desta pesquisa. Ao professor Matheus Mello Pereira, pela paciência e disponibilidade durante a escrita deste trabalho.

Ao Laboratório de Robótica, Soldagem e Simulação da UFMG, por abrir as portas e disponibilizar o uso dos equipamentos para esta pesquisa. Em especial, meu agradecimento a Orlando Mauricio Castellanos Gonzalez, pela disponibilidade e ajuda durante a execução dos trabalhos.

Agradeço também aos professores Almir Silva Neto e Valmir Dias Luiz por se disporem a compor a Banca Examinadora. Ao CEFET-MG e ao corpo docente do departamento de Metalurgia e Química, por contribuírem para o meu desenvolvimento acadêmico, profissional e pessoal.

Meus sinceros agradecimentos a todos que contribuíram, direta ou indiretamente, para a minha formação.

RESUMO

Em meio ao crescimento da indústria petrolífera brasileira, a pesquisa de novos materiais para solda é crucial. Nesse cenário a soldagem com Arames Tubulares Autoprottegidos (FCAW) destaca-se por seu baixo custo de investimento, versatilidade em campo e alta produtividade. O propósito deste estudo foi a avaliação da produção e da qualidade de arames tubulares para a soldagem FCAW a partir de uma formulação inovadora e usando uma máquina experimental em escala de laboratório. O presente trabalho passa pela fabricação, análise do desempenho dos arames e a caracterização da junta soldada. Durante a fabricação, uma fita de metal dúctil é tracionada por um tambor e é submetida de forma contínua a passes de conformações, durante o processo o fluxo é adicionado. Os consumíveis tiveram variações na fluorita como ingrediente de fluxo e as soldas foram realizadas em uma chapa de aço A36 como metal de base, foram colhidos três cordões por arame. A análise e caracterização dos arames tubulares foram realizadas através da medição de seus diâmetros, da avaliação da seção transversal (circularidade e tipo de fechamento) e da determinação da taxa de preenchimento. Resultados satisfatórios foram obtidos em relação ao diâmetro e à circularidade dos arames, além da estabilidade do processo de fabricação, que foi evidenciada pela taxa de preenchimento. A caracterização das soldas produzidas foi conduzida por meio da análise transversal, considerando a relação de penetração, reforço e largura, bem como pela avaliação da morfologia do cordão e pela realização de ensaios de dureza. As soldas demonstraram eficácia, revelando uma relação positiva entre penetração, reforço e largura. Os ensaios de dureza realizados na região da zona fundida e na zona termicamente afetada demonstraram resultados crescentes à medida que o teor de fluorita no fluxo aumentou. Além disso, as micrografias das soldas revelaram um alto conteúdo de ferrita acicular, o que indica uma excelente qualidade das soldas produzidas no âmbito deste estudo. Em suma, a partir dos resultados colhidos, pode-se afirmar a boa qualidade e repetibilidade do processo de fabricação do arame e o fluxo desenvolvido se mostrou com um excelente desempenho.

Palavras-chave: Arames Tubulares Autoprottegidos; Máquina Experimental; Desenvolvimento de novos consumíveis.

ABSTRACT

Amid the growth of the Brazilian oil industry, research into new welding materials is crucial. In this scenario, welding with Self-Protected Tubular Wires (FCAW) stands out for its low investment cost, versatility in the field and high productivity. The purpose of this study was to evaluate the production and quality of wires for FCAW, using an experimental machine on a laboratory scale, based on an innovative formulation, and was divided into two parts, the manufacturing and analysis of the performance of the wires. and the welding test and characterization of the welded joint. The manufacturing of tubular wires was carried out using an experimental machine, in which initially a ductile metal strip is pulled by a drum and is continuously subjected to forming passes where the properly homogenized flux is added. The wires produced had variations in fluorite as a flux ingredient. The welds were carried out on an A36 steel plate as the base metal and three beads were harvested per wire. The analysis and characterization of the tubular wires were carried out by measuring their diameters, evaluating the cross section (circularity and type of closure) and determining the filling rate. Satisfactory results were obtained in relation to the diameter and circularity of the wires, in addition to the stability of the manufacturing process, which was evidenced by the filling rate. The characterization of the welds produced was conducted through cross-sectional analysis, considering the relationship of penetration, reinforcement and width, as well as by evaluating the morphology of the bead and carrying out hardness tests. The welds demonstrated effectiveness, revealing a positive relationship between penetration, reinforcement and width. Hardness tests carried out in the region of the molten zone and in the heat-affected zone demonstrated increasing results as the fluorite content in the flow increased. Furthermore, micrographs of the welds revealed a high content of acicular ferrite, which indicates an excellent quality of the welds produced within the scope of this study. In short, based on the results collected, it is possible to confirm the good quality and repeatability of the wire manufacturing process and the flow developed showed excellent performance.

Keywords: Self-protected tubular wires; Experimental Machine; Development of new consumables.

LISTA DE ILUSTRAÇÕES

Figura 1 – Corte transversal de uma solda especificando a posição da ZF, ZTA e MB,	14
Figura 2 – Soldagem com arame tubular.	15
Figura 3 – Diferenciação entre os tipos de arames tubulares.	18
Figura 4 – Modelo esquemático de soldagem com arame tubular com gás de proteção.	19
Figura 5 – Desenho esquemático de uma solda por arame tubular autoprotegido. .	20
Figura 6 – Variação da solubilidade do H em relação a temperatura em um metal de solda.	21
Figura 7 – Difusão do hidrogênio do metal de solda para a ZTA durante a soldagem.	21
Figura 8 – Desenho esquemático da ferrita primária de contorno de grão PF(G). . .	24
Figura 9 – Desenho esquemático da ferrita primária intragranular poligonal.	24
Figura 10 – Desenho esquemático da ferrita Acicular (AF).	25
Figura 11 – Modelo esquemático do metal de base.	26
Figura 12 – (a) Representação esquemática da fita e (b) Rolo de fita.	26
Figura 13 – Equipamento de fabricação de arames tubulares.	27
Figura 14 – Modelo esquemático do ensaio de soldagem.	28
Figura 15 – Esquema da metodologia utilizada na realização do trabalho.	29
Figura 16 – Roletes 1 e 2 de conformação.	30
Figura 17 – Esquema de conformação e fabricação do arame tubular.	30
Figura 18 – a) Fieira trefiladora b) Tambor de tracionamento.	31
Figura 19 – Modelo esquemático do embutimento dos arames tubulares.	32
Figura 20 – (a) Arame fechado com fluxo e (b) Arame aberto sem fluxo.	32
Figura 21 – Modelo esquemático de medição de Penetração, Reforço e Largura. . .	34
Figura 22 – Diâmetro do arame produzido.	35
Figura 23 – Tipo de fechamento dos arames analisados.	35
Figura 24 – Microestrutura do Metal de Base usado na solda. Ampliação: 100x. . . .	36
Figura 25 – Cordões da solda produzida.	37
Figura 26 – Macrografias da seção transversal das soldas realizadas.	37
Figura 27 – Gráfico Penetração X Reforço X Largura.	38
Figura 28 – Microestrutura do metal de solda (ZF) das três amostras trabalhadas. Composta por ferrita acicular (AF), ferrita primária poligonal intragranular (PF(I)) e ferrita primária de contorno de grão(PF(G)). Aumento 100x. . .	39
Figura 29 – Fração volumétrica de cada constituinte apresentado nas amostras caracterizadas. Ferrita de segunda fase alinhada (FS(A)), ferrita de segunda fase não alinhada (FS(NA)), ferrita primária poligonal intragranular (PF(I)), ferrita primária de contorno de grão (PF(G)) e ferrita acicular (FA).	39

Figura 30 – Microdureza apresentada para cada região dos cordões de solda. . . . 40

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 – Arame tubular classificado pela AWS.	16
Tabela 2 – Funções do fluxo do arame tubular e os elementos químicos relacionados à propriedade.	22
Tabela 3 – Composição química do Aço ASTM A36 (porcentagem em peso).	26
Tabela 4 – Composição do fluxo das amostras trabalhadas (porcentagem em peso).	27
Tabela 5 – Bitola das feiras.	31
Tabela 6 – Percentuais de Taxa de Fluxo.	36
Tabela 7 – Valores médios e desvio padrão das medições de Penetração, Reforço e Largura.	38
Tabela 8 – Microdureza apresentada para cada cordão de solda.	40

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

FCAW	Soldagem ao arco elétrico com arame tubular, do inglês <i>Flux-Cored Arc Welding</i>
ZTA	Zona Termicamente Afetada
ZF	Zona Fundida
MB	Metal de Base
SMAW	Eletrodo Revestido, do inglês <i>Shielded Metal Arc Welding</i>
F0	0% de CaF_2
F7	7% de CaF_2
F14	14% de CaF_2
HV	Dureza Vickers, do inglês <i>Hardness Vickers</i>
GMAW	<i>Gas Metal Arc Welding</i> , ou em português, Soldagem ao Arco Elétrico com Gás de Proteção.
PF(G)	Ferrita primária de contorno de grão
PF(I)	Ferrita primária intragranular poligonal
AF	Ferrita Acicular

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO	12
2	OBJETIVOS	13
2.1	OBJETIVO GERAL	13
2.2	OBJETIVOS ESPECÍFICOS	13
3	REFERENCIAL TEÓRICO	14
3.1	SOLDAGEM POR FUSÃO A ARCO ELÉTRICO	14
3.2	SOLDAGEM COM ARAME TUBULAR	15
3.2.1	Características da soldagem com arame tubular	15
3.2.2	Vantagens da soldagem com arame tubular	17
3.2.3	Desvantagens da soldagem com arame tubular	18
3.3	TIPOS DE ARAMES	18
3.3.1	Arames tubulares com gás de proteção	19
3.3.2	Arames tubulares Autoprotégidos	20
3.4	FLUXOS NO ARAME TUBULAR	22
3.5	MICROESTRUTURAS NA SOLDAGEM	23
4	MATERIAIS E MÉTODOS	26
4.1	MATERIAIS	26
4.2	EQUIPAMENTOS	27
4.3	MÉTODO	28
4.3.1	Preparação do Fluxo e ajustes da Máquina de Fabricação	29
4.3.2	Manufatura dos Arames	29
4.3.3	Análise dos arames tubulares	32
4.3.4	Processo de Soldagem	33
4.3.5	Caracterização da solda	33
5	RESULTADOS E DISCUSSÃO	35
5.1	ANÁLISE DA FABRICAÇÃO DOS ARAMES	35
5.2	ANÁLISE DAS SOLDAS	36
6	CONCLUSÃO	41
	REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	42

1 INTRODUÇÃO

No contexto do significativo crescimento da indústria petrolífera brasileira nos últimos anos, a pesquisa e o desenvolvimento de novos materiais e insumos para soldagem têm se destacado. A necessidade de melhoria nas propriedades mecânicas desse tipo de aplicação demanda de novos insumos nos quais tenham estabilidade de processo, alta produtividade e atendimento de qualidade (BEMBENEK *et al.*, 2022).

Embora os eletrodos revestidos (SMAW) sejam amplamente utilizados, seu comprimento limitado restringe a produtividade. Nesse contexto, o Arame Tubular (Soldagem ao arco elétrico com arame tubular, do inglês *Flux-Cored Arc Welding* (FCAW)) destaca-se por ser um consumível contínuo, além de oferecer flexibilidade na composição, mantendo um custo relativamente baixo. (FERREIRA, 2020).

Pesquisas voltadas ao desenvolvimento de novos fluxos para soldagem com arame tubular estão sendo conduzidas globalmente, impulsionadas principalmente pela pressão para reduzir custos e aumentar a produtividade. Essas análises abrangem desde a otimização dos parâmetros de soldagem e a automação dos processos, até o desenvolvimento de novos consumíveis. (WIDGERY, 1994).

A composição química do fluxo utilizado na soldagem pode influenciar diretamente na qualidade da solda proposta, oferecendo um cordão mais estreito e aumento na penetração. Além disso, há um significativo ganho de propriedades mecânicas nos cordões de solda. Pesquisas recentes têm apontado que o uso da fluorita como componente de fluxo em arames está associada a melhorias nas propriedades mecânicas e microestruturais com resultados de altas concentrações Ferrita Acicular (AF) na Zona Fundida (ZF) das soldas produzidas. Esses arames também demonstram resultados excepcionais em termos de desempenho de soldagem, com reduções substanciais na formação de porosidade e inclusões. (KIM; LEE; SOHN, 2018; ZHANG *et al.*, 2019).

A utilização de equipamentos em escala piloto para fabricação de arames tubulares autoprotetidos são fortes elementos geradores de pesquisa e mostram resultados satisfatórios no que diz respeito a capacidade de produção, além das características do arame produzido, como homogeneidade na distribuição de fluxo, tipo de fechamento e no diâmetro ao longo do comprimento do arame e teve ampla utilização para desenvolvimento de novos consumíveis de soldagem com adição de polímeros e para soldagem subaquática (VAZ *et al.*, 2017; AMARAL, 2021).

2 OBJETIVOS

2.1 OBJETIVO GERAL

O presente trabalho busca, de modo geral, aprofundar o conhecimento sobre consumíveis de soldagem por arame tubular, através do desenvolvimento, em escala laboratorial, de arames tubulares com ingredientes de fluxo de soldagem de caráter inovador.

2.2 OBJETIVOS ESPECÍFICOS

- Analisar a seção transversal dos arames produzidos, avaliando sua circularidade e o tipo de fechamento por meio de análise macroscópica, com o objetivo de verificar a qualidade dos arames fabricados.;
- Verificar a repetibilidade do processo a partir da análise da taxa de preenchimento e homogeneidade do diâmetro do arame;
- Validar a produção em escala laboratorial de arames tubulares para soldagem;
- Analisar a morfologia do cordão produzido pelo fluxo inovador, por meio da análise macroscópica;
- Realizar análises quantitativas e qualitativas da microestrutura resultante da solda, via microscopia ótica com o auxílio do software imageJ;
- Verificar a relação de penetração, reforço e largura da solda em função da adição de fluorita utilizando-se da técnica de macroscópica ótica;
- Verificar as possíveis descontinuidades presentes no cordão a partir das imagens macro e microscópicas geradas;
- Caracterizar a microdureza do metal de solda produzido por meio do ensaio de dureza Vickers.

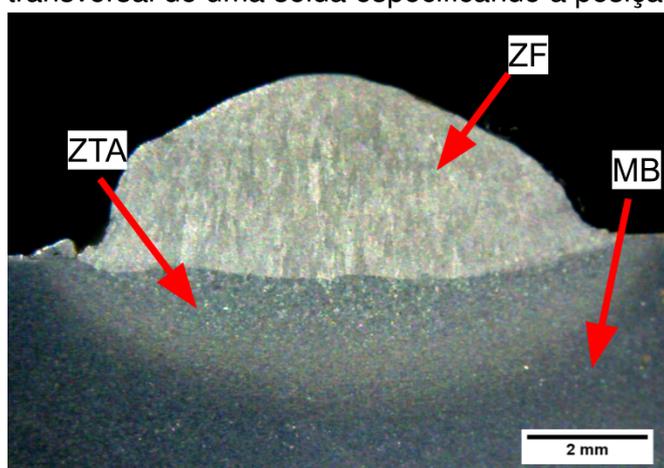
3 REFERENCIAL TEÓRICO

3.1 SOLDAGEM POR FUSÃO A ARCO ELÉTRICO

A soldagem é a técnica na qual proporciona a união entre metais, onde essa união pode ocorrer a partir de diversos fenômenos, sejam eles químicos, mecânicos ou metalúrgicos. A soldagem por fusão se baseia na elevação da temperatura do metal até o ponto de fusão para a sua coalescência, e nesse caso, a energia necessária para que isso ocorra advém do arco elétrico. Durante a soldagem há a movimentação do eletrodo em toda a seção, essa movimentação da fonte de calor promove a mudança do estado físico do metal (líquido - sólido), transformações de fases metalúrgicas e gradiente térmico, gerando tensões residuais no produto final. Essas características são amenizadas de acordo com os parâmetros do equipamento de solda (velocidade da solda, ângulo, taxa de alimentação de eletrodo, corrente, tensão, etc) e também pela variação do eletrodo escolhido (JEFFUS, 2016).

A fusão via arco é uma técnica que submete o material à situações extremas de temperatura e um período curto de arrefecimento térmico. Diante disso as propriedades resultantes são de difícil previsibilidade, tornando-se crucial a análise da solda realizada. As três principais zonas que envolvem a soldagem são o Metal de Base (MB), Zona Termicamente Afetada (ZTA) e Zona Fundida (ZF). As três zonas citadas são apresentadas na Figura 1 (DEBROY; DAVID, 1995).

Figura 1 – Corte transversal de uma solda especificando a posição da ZF, ZTA e MB,



Fonte: Elaborado pelo autor (2023).

O Metal de Base (MB) é a região da peça não afetada pelo processo de soldagem, e tem um papel fundamental na escolha do consumível e até mesmo da técnica utilizada. Solda em materiais dissimilares, por exemplo, sofrem com a instabilidade termodinâmica associada à diferença de composição química dos dois materiais submetidos ao ensaio,

gerando descontinuidades ou até mesmo falha no cordão resultante (LUNDIN, 1982).

Já a ZTA, como o próprio nome já diz, é a região afetada termicamente. Nessa região temos um ponto crítico do processo, onde há transformações de fase, retenção de elementos em forma de gás e formações de descontinuidades nas quais podem condenar a peça soldada. Por fim, a Zona Fundida (ZF) é a promotora da coalescência do material e onde estão concentradas o maior fluxo de calor, além da transformações de estado físico do material (GUO *et al.*, 2019).

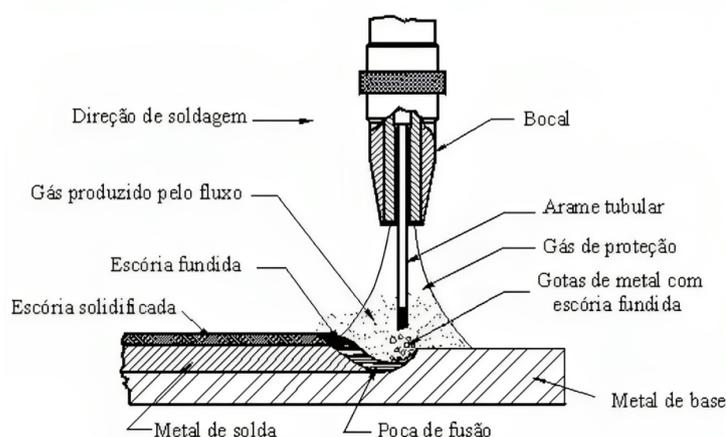
A soldagem por fusão a arco elétrico é a principal forma de união entre metais utilizado na indústria durante o século XXI, e é subdividida de acordo com a técnica utilizada. Dentro dessa subdivisão há técnicas que se destacam, como Eletrodo Revestido, do inglês *Shielded Metal Arc Welding* (SMAW), *Gas Metal Arc Welding*, ou em português, Soldagem ao Arco Elétrico com Gás de Proteção. (GMAW) e FCAW, nas quais possuem aplicações e características próprias. A crescente demanda por soldagem subaquática molhada em ambientes cada vez mais desafiadores são motores para o desenvolvimento de novos fluxos de soldagem. Atualmente a técnica FCAW se destaca, sendo tema de diversos artigos e estudos (AMARAL, 2021; PESSOA; LIU, 2021).

3.2 SOLDAGEM COM ARAME TUBULAR

3.2.1 Características da soldagem com arame tubular

O processo de soldagem por Arame Tubular (FCAW) é uma técnica de fusão a arco elétrico, ou seja, há uma coalescência de metais através de um eletrodo consumível por meio de um arco elétrico (Figura 2). O eletrodo utilizado é constituído por um arame tubular preenchido pelo fluxo de soldagem com composição química variada (KIM; LEE; SOHN, 2018).

Figura 2 – Soldagem com arame tubular.



Fonte: Luz (2000).

Assim como na solda GMAW, a solda FCAW compartilha do mesmo tipo de equipamento, onde há a tocha, a opção de utilização de gás de proteção e o consumível contínuo. Porém, o consumível utilizado na solda GMAW é maciço, o que dificulta sua replicabilidade em escala laboratorial (JOAQUIM, 2009).

A FCAW comparada com técnicas de soldagem mais populares como SMAW, por exemplo, conclui-se por diversas vantagens em seu favor. O consumível da FCAW é contínuo, o que possibilita uma alta produtividade, uma ótima aplicabilidade em campo e em locais difícil acesso. Além disso, sua versatilidade proporcionada pela variação da composição química do próprio consumível e a facilidade de automatização fazem do arame tubular ser uma ótima alternativa à outros tipos de consumíveis (FERREIRA, 2020).

O arame fabricado varia na sua característica de fechamento e são classificadas de acordo com a International Institute of Welding (IIW). Os tipos de fechamentos mais comuns são o "sem costura", "sobreposto" e "de topo". Cada tipo influi na complexidade da fabricação e conseqüentemente no custo de produção (MODENESI; BRACARENSE; MARQUES, 2005).

Estudos apontam a relação do tipo de fechamento com a geração de fumos durante a soldagem. O arame soldado (sem costura) tem o menor potencial de emissão, enquanto arames sobrepostos apresentam os maiores valores de emissão, com taxas até 40% mais altas do que os soldados. A sobreposição na seção transversal do arame contribui para a formação de fumos devido aos resíduos do processo de fabricação, como graxas de trefilação ou até mesmo a umidade (HÖFER; KUSCH; MAYR, 2021).

A classificação dos arames tubulares em relação as especificações de fabricação são determinadas pela American Welding Society (AWS) e são levadas em consideração as características como o tipo de corrente, uso de gás de proteção, posição de soldagem, e alguns outros aspectos. A tabela 1 apresenta as classificações dos arames tubulares (MODENESI; BRACARENSE; MARQUES, 2005).

Tabela 1 – Arame tubular classificado pela AWS.

Especificação	Aplicação
AWS A5.9	Arames de aço inoxidável com pó metálico interno
AWS A5.15	Arames para soldagem de ferro fundido
AWS A5.18	Arames tubulares de aço carbono com pó metálico interno
AWS A5.20	Arames tubulares de aço carbono com fluxo interno
AWS A5.21	Arames para revestimento
AWS A5.22	Arames tubulares para soldagem de aço inoxidável
AWS A5.29	Arames de aços de baixa liga com fluxo interno

Fonte: Modenesi, Bracarense e Marques (2005).

3.2.2 Vantagens da soldagem com arame tubular

A técnica de soldagem com arame tubular oferece diversas vantagens, como a redução significativa de respingos durante a execução da solda, a obtenção de uma elevada taxa (e qualidade) de metal depositado, soldas com boas características visuais, a capacidade de soldar uma variedade de aços com diferentes espessuras e uma produtividade notável. Destaca-se, também, a flexibilidade na alteração da composição química do fluxo, proporcionando melhorias nas propriedades do cordão de solda, maior estabilidade ao arco elétrico e uma proteção mais eficaz da poça de fusão (SOUZA; FERRARESI, 2013; KIL; SHIN; BANG, 2017; GOMES, 2020).

O arame tubular, em comparação com o eletrodo revestido a uma corrente média semelhante, exibe taxas de fusão superiores. Isso permite o uso de velocidades de soldagem mais elevadas, proporcionando uma produção mais rápida e, conseqüentemente, maior produtividade. Além disso há menor risco de falta de fusão lateral, melhor penetração e menor probabilidade de porosidades no cordão de solda (GARCIA; SCOTT, 2011).

Em relação aos equipamentos, tanto a soldagem com arames tubulares quanto o processo GMAW envolvem o uso de uma fonte de energia, um arco elétrico e o metal de adição. Os equipamentos utilizados, como tochas de soldagem e alimentadores de arame, são frequentemente intercambiáveis entre os dois processos, facilitando a transição e a adaptação de soldadores familiarizados com um método para o outro. Neste aspecto a adaptabilidade do operador para a utilização da FCAW é mais rápida, e dessa forma, se alternando a técnica utilizada, há uma redução no tempo e no custo do treinamento dos operadores (PRATIKNO; ABIYYUDA; DHANISTA, 2022).

Outro elemento relevante na comparação com o processo GMAW são as suas características operacionais superiores. O fluxo presente torna os consumíveis mais tolerantes às variações nas condições de operação, como velocidade de alimentação do arame e tensão do arco elétrico. Esses fatores resultam em uma minimização dos impactos na qualidade da junta soldada, gerando cordões com um perfil de solda mais largo e uma menor incidência de falta de fusão (WIDGERY, 1994).

No aspecto metalúrgico, a soldagem com arames tubulares assemelha-se à soldagem com eletrodos revestidos (SMAW). Ambos os processos envolvem o uso de um material de adição protegido por um revestimento. Esse revestimento influencia nas propriedades do metal depositado e proporciona proteção adicional à poça de fusão. Portanto, a soldagem FCAW incorpora o melhor dos dois mundos, combinando a praticidade do arame tubular com a flexibilidade metalúrgica associada aos eletrodos revestidos (MARQUES; MODENESI, 2014).

Uma outra vantagem associada ao uso do arame, está no comprimento do mesmo. Por se tratar de um arame contínuo, sua aplicação não necessita de paradas para troca

de eletrodo, proporcionando uma produtividade ainda maior quando se tem os parâmetros controlados (PANNACE, 2018).

3.2.3 Desvantagens da soldagem com arame tubular

Uma das maiores limitações da utilização do processo FCAW é o do custo associado aos equipamentos necessários para a realização da soldagem, quando comparado com outras técnicas (SMAW, por exemplo). A fabricação do arame tubular é também mais custosa se comparado com arames maciços, porém essa limitação é superada se comparado com a sua alta produtividade ao ser aplicado (MARQUES; MODENESI, 2014).

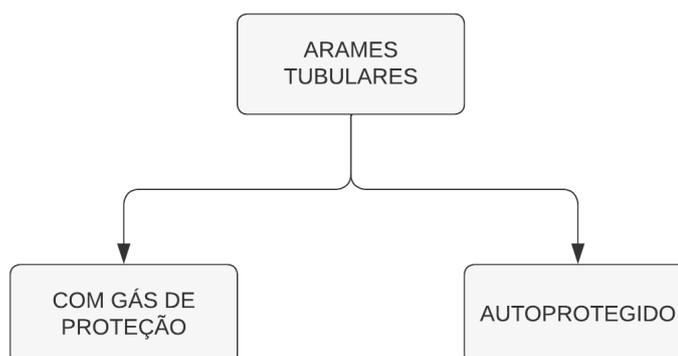
Um outro ponto de desvantagem em relação ao arame tubular é o da geração de fumos durante a realização da atividade de solda. O operador fica exposto à um ambiente de trabalho mais nocivo, uma vez que os fumos gerados em excesso expõe o mesmo à partículas metálicas. (GOMES, 2020).

Outro ponto importante de limitação na técnica é a necessidade da remoção da escória por passe, sendo necessária a limpeza do cordão de solda após a realização da mesma. Esse é um ponto no qual gera limitação de aplicação e até mesmo recusa por parte de alguns engenheiros de soldagem, uma vez que se não houver uma limpeza adequada da escória, a realização de múltiplos passes ainda com a presença de óxidos podem gerar descontinuidades na solda, com consequências gravíssimas (MA *et al.*, 2022).

3.3 TIPOS DE ARAMES

Os arames utilizados durante o processo de soldagem FCAW são classificados de acordo com a forma de proteção gasosa, sendo definidos como arames tubulares com gás de proteção e arames tubulares autoprottegidos (Figura 3). Nos capítulos 3.3.1 e 3.3.2 serão detalhados cada tipo e suas principais características (JOAQUIM, 2009).

Figura 3 – Diferenciação entre os tipos de arames tubulares.

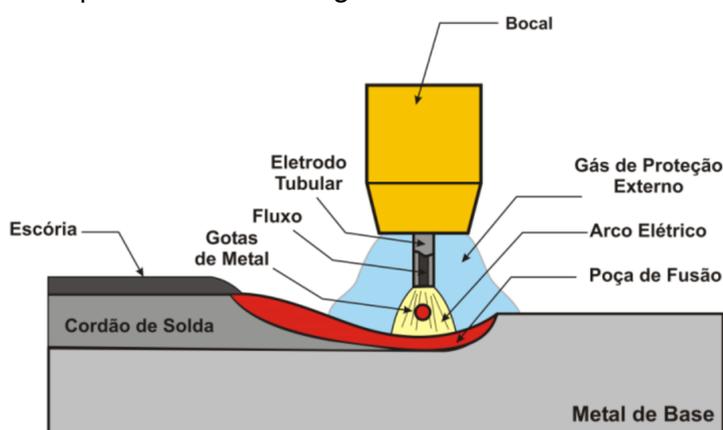


Fonte: Elaborado pelo autor (2023).

3.3.1 Arames tubulares com gás de proteção

Os gases presentes na atmosfera, ao entrarem em contato com a poça de fusão, podem originar descontinuidades na solda. Portanto, torna-se essencial proteger a poça, o arco elétrico e o arame. O uso de gás durante o processo de soldagem estabelece uma atmosfera localizada que reduz o contato da poça de fusão com o meio externo, resultando em uma diminuição significativa na solubilização de gases e impurezas do ambiente, como o hidrogênio, por exemplo. A Figura 4 apresenta o modelo esquemático que representa o uso do gás de proteção (FERREIRA, J. G., 2022).

Figura 4 – Modelo esquemático de soldagem com arame tubular com gás de proteção.



Fonte: Jeferson Goncalves Ferreira (2022).

Geralmente nesses processos são utilizados CO_2 puro, $\text{Ar} + \text{CO}_2$ ou $\text{Ar} + \text{O}_2$, e é preferível em peças mais espessas. Dessa forma, há a classificação dos gases como "ativos" ou "passivos", sendo os gases ativos aqueles nos quais reagem quimicamente com outros elementos durante o processo e os gases passivos são inertes, com participação apenas na proteção da zona fundida (FORTES, 2004).

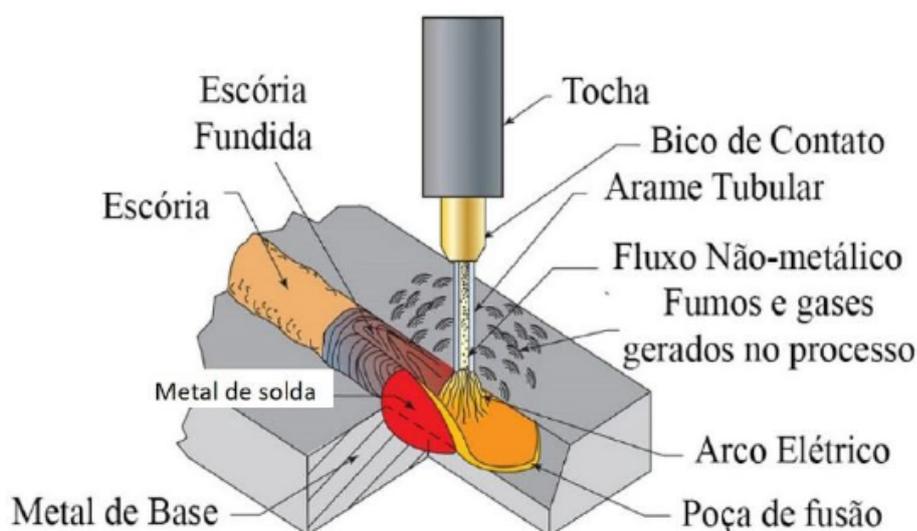
No caso de gases ativos, a composição química impacta diretamente em aspectos da solda, como o tipo de transferência metálica, penetração, formato do cordão e características do próprio arco elétrico (TATAGIBA; GONÇALVES; PARANHOS, 2012).

Os equipamentos destinados a arames tubulares com proteção gasosa são equipados com bocais com um dispositivo entre o eletrodo e sua parede interna. A alimentação do dispositivo ocorre por meio de uma conexão localizada na saída do bocal da tocha, conectada ao cilindro que armazena o gás. Uma das limitações da utilização do gás de proteção reside na sua aplicação em ambientes com elevado fluxo de vento, podendo ocasionar a dispersão parcial do gás durante o processo de soldagem, e reduzindo do efeito protetor proporcionado pelo gás (GUY, 2021).

3.3.2 Arames tubulares Autoprottegidos

Assim como o próprio nome indica, o arame tubular autoprottegido não necessita de gás de proteção durante a soldagem. O fluxo interno do arame possui constituintes nos quais, ao serem submetidos às temperaturas de atividade, se volatilizam e geram um ambiente protetor, evitando o contato da atmosfera junto à poça de solda (Figura 5) (FORTES, 2004).

Figura 5 – Desenho esquemático de uma solda por arame tubular autoprottegido.



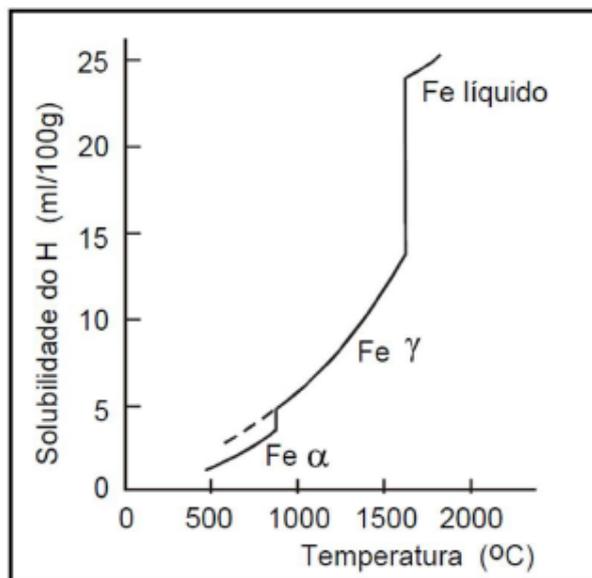
Fonte: Adaptado de Jeffus (2016).

Além de criar uma atmosfera protetora, a adição de elementos visa também formar escórias que protegem a poça de fusão. Assim, além dos resultados metalúrgicos relacionados ao desempenho mecânico, há uma preocupação adicional com a proteção do cordão de solda durante o processo de soldagem. Essa consideração acrescenta complexidade ao desenvolvimento e elaboração de um novo consumível. (MA *et al.*, 2022).

Durante a transferência metálica o hidrogênio, por exemplo, pode se solubilizar na região fundida gerando um defeito conhecido por "trinca induzida por hidrogênio". A solubilidade do Hidrogênio em aço líquido é relativamente alta, e decresce bruscamente a medida que o aço solidifica. O H se difunde muito mais lentamente na austenita se comparado a ferrita e durante o resfriamento essa solubilidade tende a diminuir ainda mais, conforme o gráfico da Figura 6 (BAILEY, 1993; PADHY; KOMIZO, 2013).

Associando a solubilidade do hidrogênio com tensões residuais promovidas pela própria técnica de soldagem, além de microestrutura frágil (martensita, por exemplo), há o mecanismo da trinca. Geralmente o metal de solda tem um teor de carbono menor que o MB, resultando na transformação da austenita para ferrita e perlita ($\alpha + Fe_3C$) no

Figura 6 – Variação da solubilidade do H em relação a temperatura em um metal de solda.

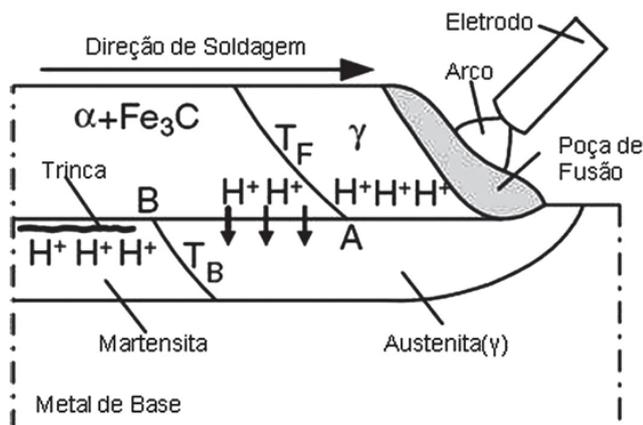


Fonte: Bailey (1994).

metal de solda antes que ocorra a transformação da austenita para martensita na ZTA (ŁABANOWSKI; FYDRYCH; ROGALSKI, 2008).

Devido à menor capacidade de absorção de hidrogênio na ferrita em comparação com a austenita, o hidrogênio é expelido do metal de solda ferrítico. Esse processo de difusão é facilitado pelo alto coeficiente de difusão do hidrogênio na ferrita. Por outro lado, na ZTA, o hidrogênio não se espalha para áreas mais distantes, como no MB, devido ao baixo coeficiente de difusão e à alta solubilidade na austenita. O hidrogênio retido, após o resfriamento da peça, tende a se difundir para fora do material já com o seu ciclo térmico acabado, aumentando assim o risco de trincamento por hidrogênio. A Figura 7 ilustra a explicação (BAILEY, 1994).

Figura 7 – Difusão do hidrogênio do metal de solda para a ZTA durante a soldagem.



Fonte: Kou (2003).

3.4 FLUXOS NO ARAME TUBULAR

A mistura de pós utilizada como preenchimento do arame tubular é denominada fluxo, e tem sua composição química contendo elementos metálicos e não metálicos. Os fluxos utilizados no processo FCAW possuem as mesmas características dos metais de adição utilizados no processo SMAW e segundo Fortes (2004), tem sua definição em função da sua influência na solda sendo os fluxos desoxidantes, formadores de escória, estabilizadores de arco, elementos de liga e geradores de gases.

A estabilização do arco, para além dos parâmetros de soldagem, também sofrem a influência dos elementos contidos no fluxo do arame. obter suavidade no arco e conseqüentemente uma redução dos respingos, trás uma qualidade maior e uma redução na suscetibilidade de descontinuidades, e para isso geralmente são utilizados elementos como o sódio e o potássio. Os desoxidantes têm em sua composição a presença de manganês e silício, por exemplo, para a redução dos gases solubilizados nos quais podem gerar porosidades e fragilidade na junta soldada (ABBAS; HAMDY; AHMED, 2020).

Os formadores de escória promovem a proteção da poça da atmosfera, ajudando no perfil do cordão e até mesmo reduzindo a taxa de resfriamento, o que é importante quando trata-se de aços de baixas ligas. Nesse caso, elementos como óxidos de cálcio, potássio, rutilo, silício, ou sódio, são adicionados para conferir tais resultados (MA *et al.*, 2022).

No caso de arames tubulares autoprotetidos, a geração de gases protetores é fundamental para uma boa execução de soldagem, nesse caso, arames tubulares com calcário em seu ingrediente são comuns. Além das funções já citadas, há também os elementos de liga nos quais influenciam diretamente na qualidade da solda, os principais elementos de ligas utilizados são molibdênio, cromo, carbono, manganês, níquel e vanádio. A Tabela 2 trás o resumo dos principais elementos químicos em função da propriedade resultante na soldagem (FORTES, 2004).

Tabela 2 – Funções do fluxo do arame tubular e os elementos químicos relacionados à propriedade.

Funções do fluxo	Elementos geralmente utilizados
Estabilização do arco	Na e K
Desoxidante	Mn e Si
Formadores de escória	CaO, K, TiO ₂ , Si e Na
Geração de gases	CaCO ₃
Elementos de liga	Mo, Cr, C, Mn, Ni e V

Fonte: Fortes (2004).

A composição de fluxo tem sua basicidade influenciando seu desempenho, Olson *et al.* (1993) citam que fluxos ácidos geram um melhor comportamento de escória, resultando em melhores morfologias e taxas de deposição no cordão. Esse índice também trás a relação das inclusões no metal de solda, Modenesi, Bracarense e Marques (2005) relacionam fluxos com maior índice de basicidade e a redução das inclusões não metálicas, resultando em melhores propriedades mecânicas.

Apesar do índice de basicidade ser amplamente utilizado na indústria para uma previsibilidade das inclusões durante a solda, essa relação deve ser cautelosa, uma vez que não há a consideração das propriedades físicas dos componentes do fluxo (OLSON *et al.*, 1993).

3.5 MICROESTRUTURAS NA SOLDAGEM

Os parâmetros de soldagem alteram geometria final do cordão de solda. Por exemplo, mantendo tensão e corrente constantes e aumentando a velocidade de soldagem, menor a largura do cordão de solda por haver uma menor energia de soldagem. A partir de outras variações, observou-se na literatura uma relação direta entre a tensão e a penetração da solda. Dessa forma, para além das características físicas do consumível utilizado, os parâmetros de soldagem determinam a qualidade do cordão (LIMA *et al.*, 2005).

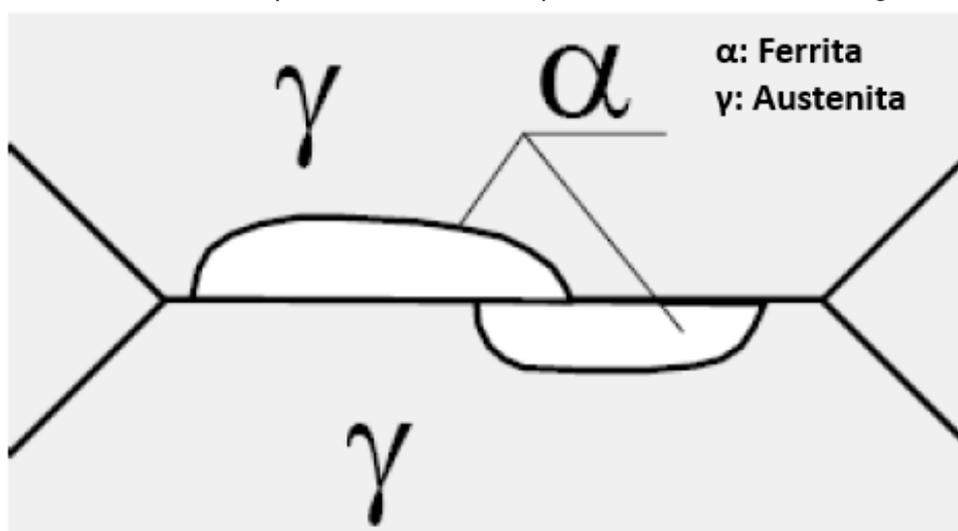
Além da influencia na morfologia do cordão, a alteração de parâmetros também influencia no ciclo térmico da solda, e com isso, há uma alteração na forma da transformação de fase durante a solidificação. Porém, para além do ciclo térmico, a composição química também influencia na microestrutura, sendo um forte elemento para variação no fluxo de soldagem (BHADESHIA, 2001; LIMA LESSA, 2011).

A ferrita primária é um microconstituente formado durante a soldagem e é subdividida em dois microconstituente, a Ferrita primária de contorno de grão (PF(G)) e a Ferrita primária intragranular poligonal (PF(I)) (MODENESI; BRACARENSE; MARQUES, 2005).

A PF(G) é o primeiro constituinte formado a partir da decomposição da austenita. Ela se forma em elevadas temperaturas a partir de cristais de ferritas que se nuclearam nos contornos de grãos austenítico. Isso ocorre porque contornos de grãos são regiões de fácil difusão, onde as placas de ferrita se formam e vão crescendo de acordo com a taxa de difusão do carbono da austenita. A Figura 8 apresenta o modelo esquemático desse tipo de ferrita (LIMA LESSA, 2011).

A PF(I) possui características muito próximas da PF(G), porém com uma morfologia equiaxial e com sua sua formação um pouco diferente. Havendo pontos de nucleação intragranular no interior da austenita, há a formação de ferritas nesses sítios. A formação da PF(G) ocorre antes da PF(I) devido à facilidade de difusão no contorno de grão e da energia

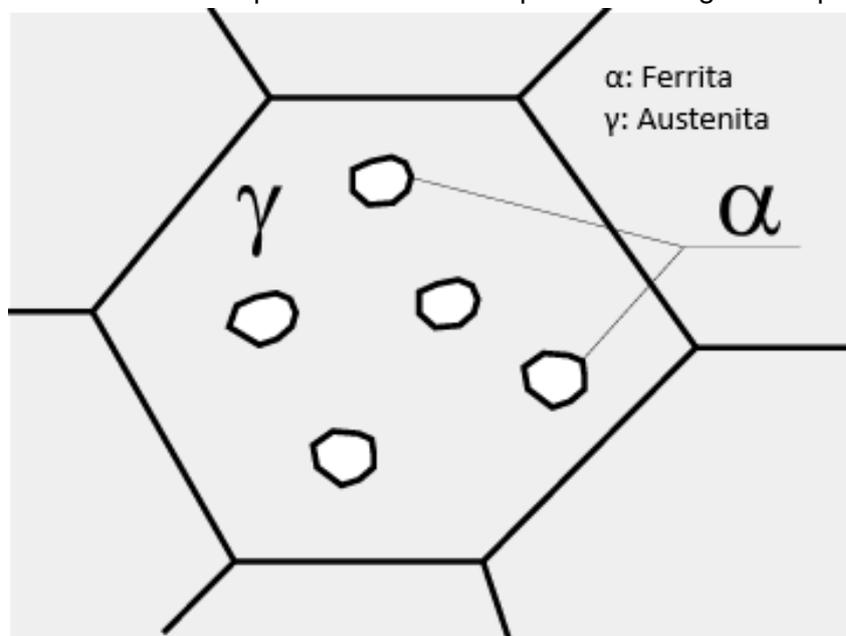
Figura 8 – Desenho esquemático da ferrita primária de contorno de grão PF(G).



Fonte: Modenesi, Bracarense e Marques (2005).

associada ao mesmo. A formação de ferritas primárias estão associadas a soldagens com baixo teor de elementos de liga e/ou baixas velocidades de resfriamento. A Figura 9 mostra esquematicamente a morfologia da PF(I) (MODENESI; BRACARENSE; MARQUES, 2005).

Figura 9 – Desenho esquemático da ferrita primária intragranular poligonal.

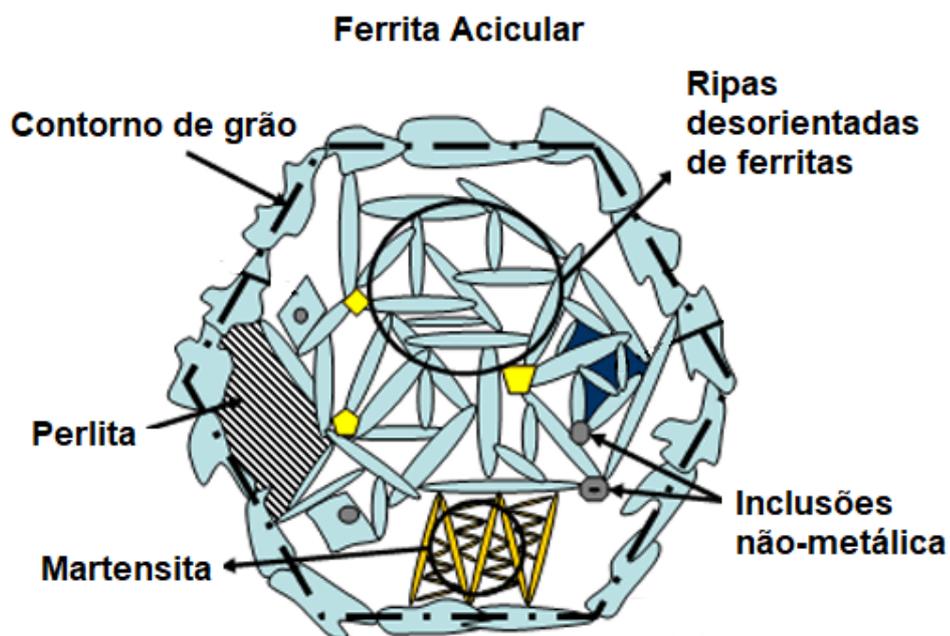


Fonte: Modenesi, Bracarense e Marques (2005).

Já a AF é um microconstituente caracterizado pelo cisalhamento da matriz austenítica, na qual as placas de ferrita se nucleiam heterogeneamente a partir de pequenas inclusões não metálicas. Esses microconstituíntes, então, crescem em diferentes direções cristalina, de forma desordenada e aleatória. Como as placas ferríticas desse tipo de microestrutura possuem direções cristalográficas desordenadas e

diferentes, a propagação de trincas é dificultada, conferindo uma boa relação de dureza e tenacidade, gerando melhores propriedades mecânicas. Com isso a utilização de óxidos como TiO_2 e SiO_2 são comuns como ingredientes de fluxos para aumentar o potencial de formação desse microconstituente, uma vez que estes formam pontos de nucleação heterogênea durante a soldagem (BHADESHIA, 2001; ARAÚJO, 2006).

Figura 10 – Desenho esquemático da ferrita Acicular (AF).



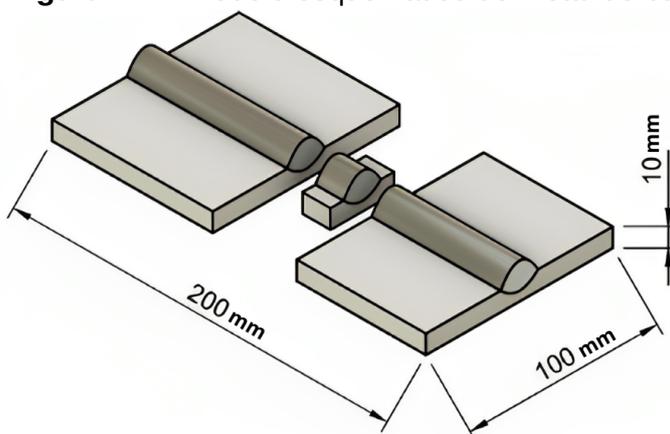
Fonte: Adaptado de Villegas *et al.* (2005).

4 MATERIAIS E MÉTODOS

4.1 MATERIAIS

Para a realização dos ensaios experimentais deste presente trabalho, foram utilizadas chapas de aço ASTM A-36 como MB para a deposição dos cordões de solda. As dimensões da chapa são de 200mm de comprimento, 100mm de largura e 10mm de espessura (Figura 11). A composição química está descrita na Tabela 3.

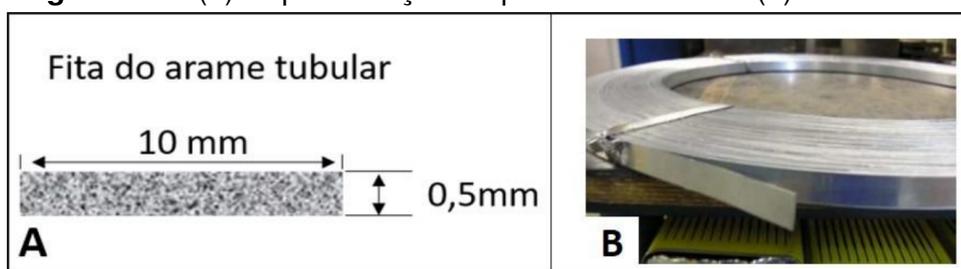
Figura 11 – Modelo esquemático do metal de base.



Fonte: Elaborado pelo autor (2023).

A fita utilizada para a confecção dos arames tubulares foi disposta em um carretel e é classificada como aço com aproximadamente 0,05% (em peso) de carbono (SAE1005) (Figura 12), com propriedades de ductilidade suficientes para a trefilação e com dimensões de 10mm de largura e 0,5mm de espessura.

Figura 12 – (a) Representação esquemática da fita e (b) Rolo de fita.



Fonte: Elaborado pelo autor (2023).

Tabela 3 – Composição química do Aço ASTM A36 (porcentagem em peso).

C	Si	Mn	P	S	Al	Nb, V e Ti	Ni, Cr, Cu e Mo	N
0,16%	0,2%	0,7%	≤ 0,02%	≤ 0,01%	0,03%	≤ 0,005%	≤ 0,05%	≤ 0,01%

Fonte: Elaborado pelo autor (2023).

O fluxo utilizado para o preenchimento interno do arame é de composição inovadora, com potencial para desenvolvimento de uma nova patente. No presente estudo foram adicionados fluorita com variação de 0%, 7% e 14% em três arames distintos denominados de 0% de CaF_2 (F0), 7% de CaF_2 (F7) e 14% de CaF_2 (F14) com a composição química apresentada pela Tabela 4.

Tabela 4 – Composição do fluxo das amostras trabalhadas (porcentagem em peso).

Elemento Químico	F0	F7	F14
Pó de Ferro	14%	7%	0%
CaF_2	0%	7%	14%
Outros	86%	86%	86%

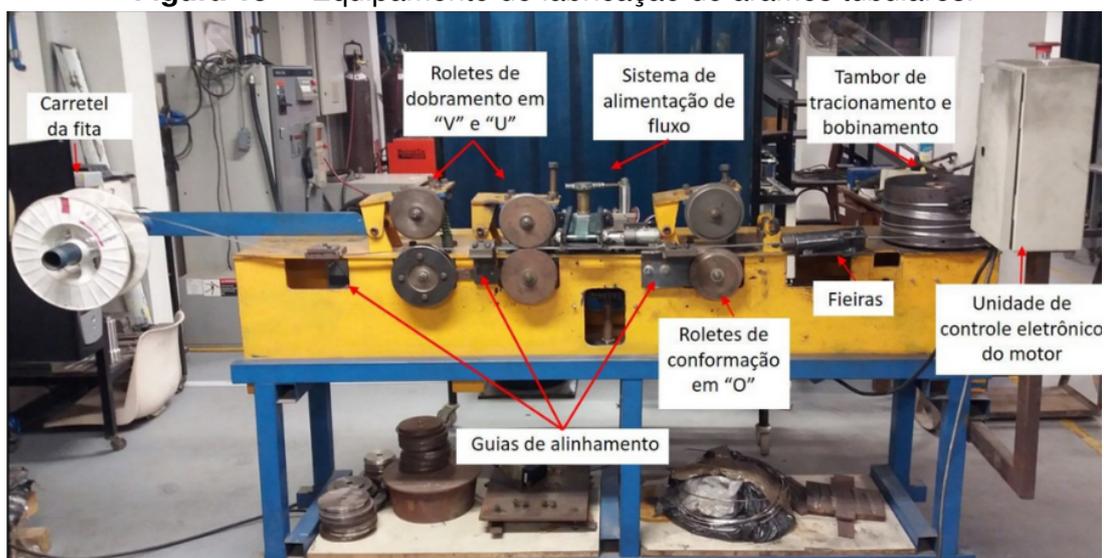
Fonte: Elaborado pelo autor (2023).

Para a confecção do fluxo, os elementos foram homogeneizados em um recipiente e posteriormente aquecidos próximos a 200°C para remoção da umidade, evitando uma possível contaminação.

4.2 EQUIPAMENTOS

A fabricação dos arames foi realizada a partir de uma máquina experimental (Figura 13) presente no Laboratório de Robótica, Simulação e Soldagem da UFMG (LRSS-UFMG) desenvolvido no próprio laboratório (OLIVEIRA, 2010).

Figura 13 – Equipamento de fabricação de arames tubulares.

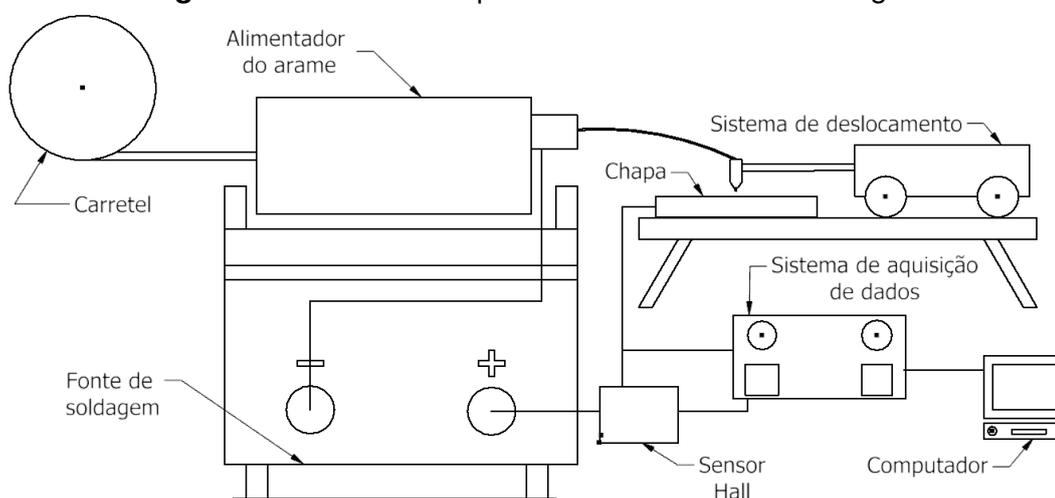


Fonte: Elaborado pelo autor (2023).

A composição do fluxo foi atendida utilizando uma balança de precisão eletrônica semi-analítica modelo BL320H, da marca Marte Científica, no qual possui resolução de 0,001g e uma faixa de operação entre 0,02g e 320g, permitindo uma boa fidelidade na medição das massas dos constituintes do fluxo. O equipamento está disposto no laboratório de ensaios mecânicos do CEFET-MG, em Timóteo, Minas Gerais.

Os ensaios de soldagem foram realizados a partir da fonte inversora AristoMig 500i da marca ESAB, e foi empregado um sistema mecanizado que permite reduzir as variações relacionadas à atividade manual de soldagem, de forma que variáveis como velocidade de soldagem e a distancia entre o eletrodo e a poça de fusão se mantivessem constantes em todo o momento. O modelo esquemático do ensaio é apresentado na Figura 14.

Figura 14 – Modelo esquemático do ensaio de soldagem.



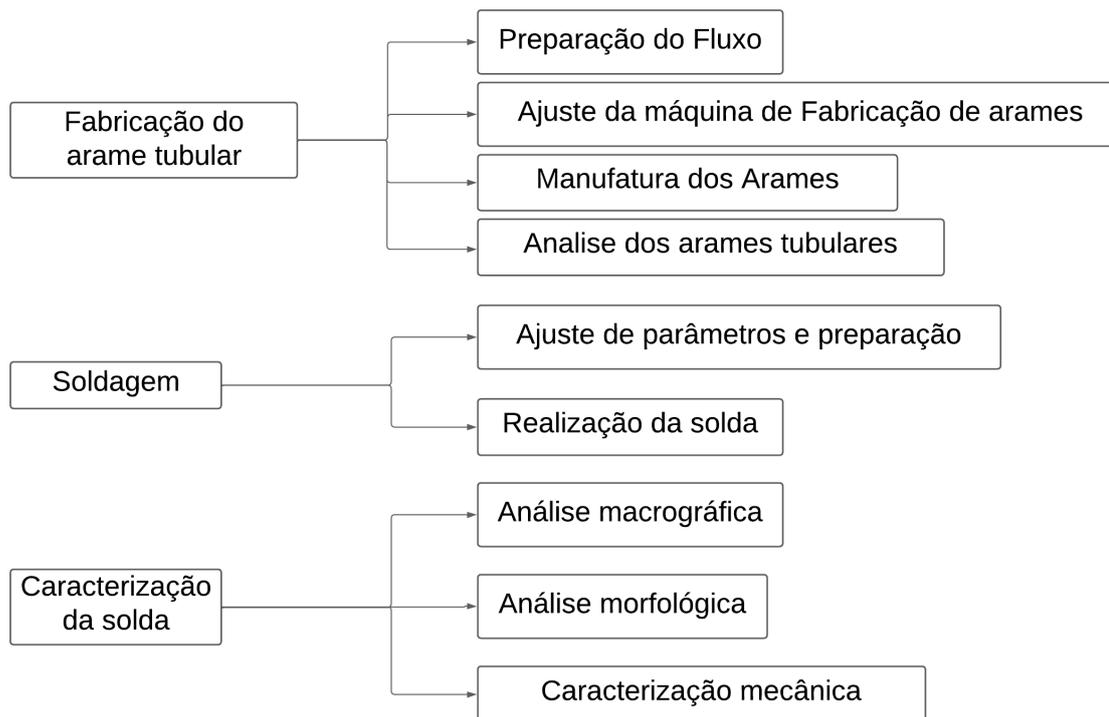
Fonte: Elaborado pelo autor (2023).

Para caracterização metalográfica dos arames e do cordão de solda foi utilizado a prensa embutidora metalográfica, marca Fortel modelo EFD e baquelite. O lixamento e polimento das amostras foram realizados na politriz PL02E marca Teclago.

4.3 MÉTODO

O método utilizado na execução do trabalho é subdividido em três etapas, sendo a inicial, onde há a fabricação do arame tubular e a análise da qualidade dos arames produzidos, posteriormente são realizados os ensaios de soldagem e por fim a caracterização da solda realizada. As etapas estão esquematizadas na Figura 15 e descritas com mais detalhes ao longo do texto.

Figura 15 – Esquema da metodologia utilizada na realização do trabalho.



Fonte: Elaborado pelo autor (2023).

4.3.1 Preparação do Fluxo e ajustes da Máquina de Fabricação

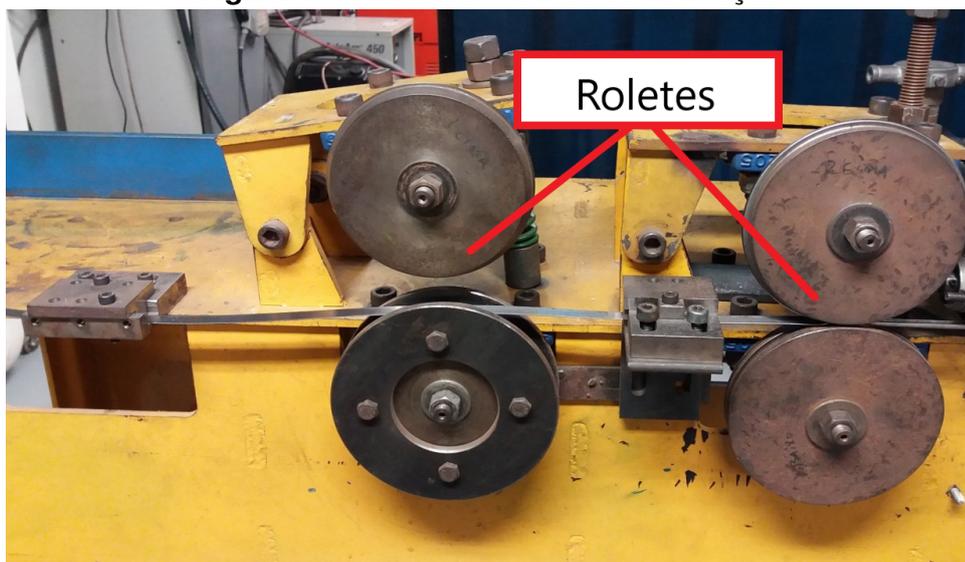
Inicialmente houve a preparação do fluxo, a partir da identificação e separação de cada componente químico (em forma de pó) utilizados como ingrediente. Três recipientes foram rotulados com o nome do arame a ser fabricado (F0, F7 e F14). As adições foram realizadas respeitando a tabela de composição química de cada arame e homogeneizadas durante 15 minutos no próprio recipiente. Para cada composição foram produzidos cerca de 450g de fluxo.

Foram realizados pequenos ajustes na máquina de fabricação de arame devido a sensibilidade da produção à rupturas durante o processo, para isso houveram o alinhamento dos roletes, preparações dos alinhadores e verificações no painel eletrônico para garantir a plena funcionalidade do equipamento.

4.3.2 Manufatura dos Arames

O processo de fabricação é dividido em duas etapas, uma relacionada a conformação e formação do arame e a segunda relacionada a trefilação e adequação do diâmetro. Após a preparação do fluxo, o carretel foi alimentado com a fita metálica a ser conformada e a máquina de fabricação de arame é constituída por três roletes de conformações e alinhadores (Figura 16) até a formação dos arames (OLIVEIRA, 2010).

Figura 16 – Roletes 1 e 2 de conformação.

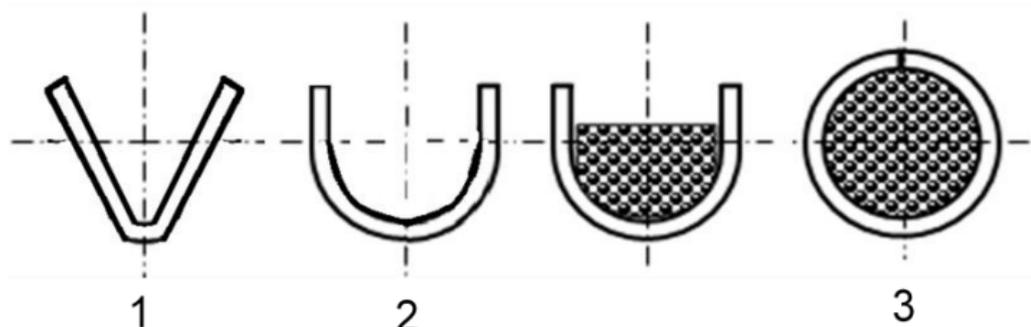


Fonte: Elaborado pelo autor (2023).

Conforme apresentado na Figura 13, a fita já disposta no carretel é posicionada junto aos alinhadores e manualmente é condicionada à linha produtiva. A fita passa pelos demais roletes, pela fieira, até o tambor de tracionamento, onde é devidamente fixada para dar início ao processo.

Após a preparação da máquina, o tambor de tracionamento é acionado com velocidade controlada de acordo com o diâmetro requerido. A fita é conformada pelo primeiro rolete em "V" e logo em seguida em "U" pelo segundo rolete. Há um silo dosador carregado com o pó do fluxo logo após o segundo rolete. O alinhador subsequente ao silo possui um regulador para redução do excesso de fluxo adicionado. Em seguida há o terceiro e último rolete, onde a fita é conformada e fechada, formando um arame de 3,7mm de diâmetro. O esquema de conformação é apresentado na Figura 17.

Figura 17 – Esquema de conformação e fabricação do arame tubular.

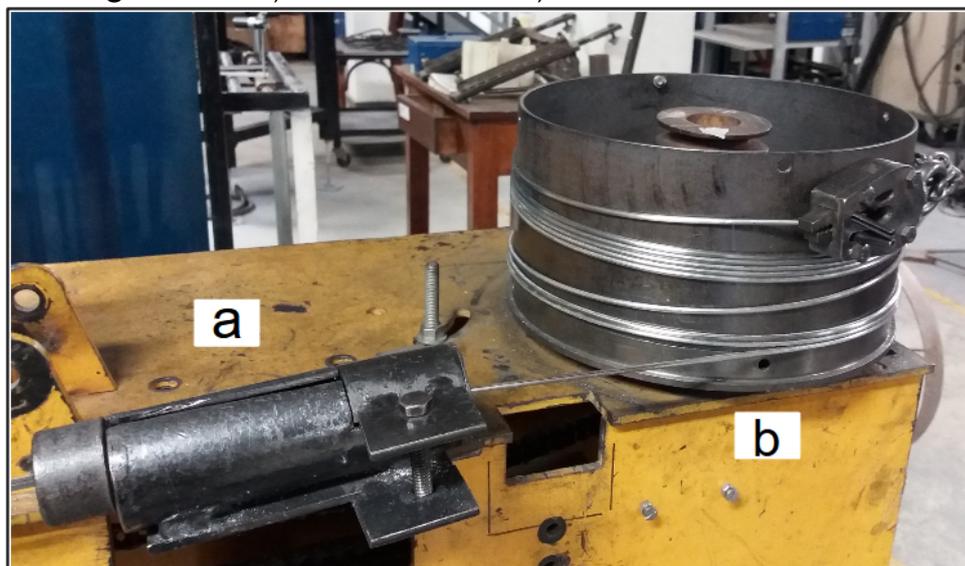


Fonte: Vaz *et al.* (2017)

A segunda etapa do processo é a de trefilação dos arames produzidos. Apenas a parte final do equipamento é utilizada nesse processo, onde a fieira é disposta (Figura 18).

O arame (inicialmente de 3,7mm) é condicionado à fieira de menor diâmetro, sua ponta é fixada ao tambor de tracionamento e a fieira é fixada junto a parte final do equipamento onde é iniciado o processo de trefilação.

Figura 18 – a) Fieira trefiladora b) Tambor de tracionamento.



Fonte: Elaborado pelo autor (2023).

Devido ao risco de ruptura do material, as bitolas reduzem de forma gradual (Tabela 5) e a velocidade de tracionamento é controlada de acordo com o diâmetro necessário, sendo de 43 metros/hora para diâmetros entre 4,0 até 2,6mm e 25 metros/hora para diâmetros entre 2,45 e 1,6mm. O diâmetro final é de 1,6mm para atendimento do padrão industrial.

Tabela 5 – Bitola das fieiras.

Fieira	Diâmetro (mm)
1	3,6
2	3,5
3	3,2
4	2,9
5	2,75
6	2,6
7	2,45
8	2,3
9	2,2
10	2
11	1,9
12	1,8
13	1,7
14	1,6

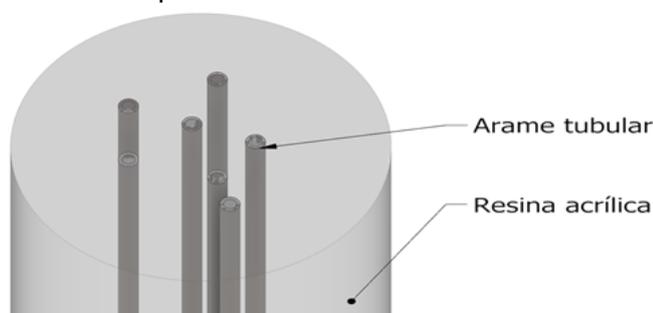
Fonte: Elaborado pelo autor (2023).

4.3.3 Análise dos arames tubulares

A análise e a caracterização dos arames fabricados para realização deste trabalho foram feitas a partir da medição do diâmetro, análise da seção transversal, na qual consiste na circularidade e no tipo de fechamento, e da taxa de fluxo (ϵ).

Para aferir o diâmetro e examinar a seção transversal dos arames, foram coletadas dez amostras ao longo da extensão de cada arame fabricado. Essas amostras foram cortadas em segmentos de 5,0 mm, e em seguida, submetidas a embutimento a frio e lixadas (Figura 19) até a granulação 600, possibilitando uma análise macroscópica detalhada.

Figura 19 – Modelo esquemático do embutimento dos arames tubulares.



Fonte: Elaborado pelo autor (2023).

Utilizou-se o software ImageJ em conjunto com a escala do microscópio empregado, visando assegurar a precisão na medição dos diâmetros e da circularidade dos arames em questão. Além disso, permitiu-se verificar o tipo de fechamento gerado durante o processo de fabricação dos arames.

A medição da Porcentagem de Fluxo foi realizada a partir de dez amostras de 100 mm de cada arame, colhidas em pontos aleatórios ao longo do seu comprimento. Foram medidas as massas referentes ao arame preenchido e vazio, e então, calculado a taxa de preenchimento (Figura 20).

Figura 20 – (a) Arame fechado com fluxo e (b) Arame aberto sem fluxo.



Fonte: Elaborado pelo autor (2023).

A equação 4.1 é utilizada para a determinação da porcentagem de fluxo (ϵ):

$$\epsilon = \left(1 - \frac{m_v}{m_p}\right) \cdot 100 \quad (4.1)$$

Onde:

- m_v = Massa do arame vazio;
- m_p = Massa do arame preenchido.

4.3.4 Processo de Soldagem

A chapa utilizada para realização da deposição dos cordões de solda tiveram sua superfície previamente preparada com escovamento via uma esmerilhadeira rotativa na qual remove óxidos e demais impurezas como óleos e graxas.

O sistema mecanizado (também conhecido como "tartaruga") foi posicionado no trilho e a chapa fixada junto a mesa. A tocha da fonte inversora foi posicionada junto à tartaruga e fixada, evitando variações no processo de soldagem. Os parâmetros de soldagem foram pré-definidos de forma a não variar durante o processo do ensaio, permitindo uma boa estabilidade no arco.

4.3.5 Caracterização da solda

Após a realização das soldas, foram colhidas três amostras de cada cordão gerado. Para isso foi utilizado uma serra fita horizontal com água, para não elevação de temperatura durante o corte.

As amostras coletadas foram embutidas em baquelite, passaram por um processo de lixamento com diferentes granulometrias (120, 220, 320, 400, 600, 800 e 1200 mesh) e rotação de 150 rpm. Em seguida, foram polidas com alumina de $1\mu\text{m}$ e $0,3\mu\text{m}$ e submetidas a um ataque químico com nital 5% (5% de ácido nítrico e 95% de álcool etílico).

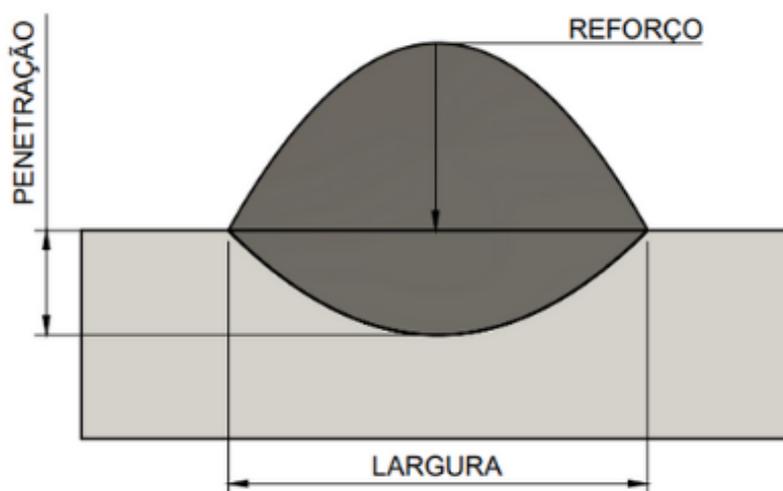
A partir disso, análise e caracterização microestrutural do metal de solda envolveram o cálculo da fração volumétrica dos constituintes formados. A metodologia empregada nessa análise seguiu as diretrizes estabelecidas pelo *International Institute of Welding (IIW)* no documento IX-1533-88, desde a preparação das amostras previamente mencionadas.

No ensaio de Dureza Vickers, do ingles *Hardness Vickers* (HV), foram realizados sete testes em cada zona do cordão de solda. Isso foi feito por meio de uma varredura vertical, que abrangia desde o topo do cordão de solda até o metal base. A carga aplicada foi de 0,94N, com um espaçamento de 0,5mm entre as endentações e um tempo de aplicação de 15 segundos em cada teste.

Utilizando o software de análise de imagem ImageJ, foram realizadas medições da

penetração (P), do reforço (R) e da largura (L) do cordão, conforme ilustrado na Figura 21.

Figura 21 – Modelo esquemático de medição de Penetração, Reforço e Largura.



Fonte: Elaborado pelo autor (2023).

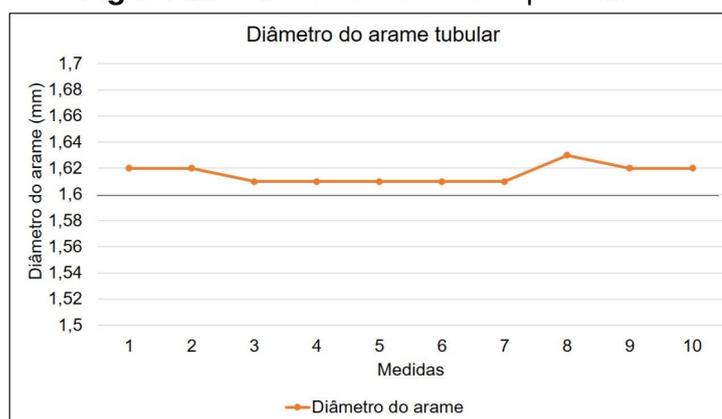
5 RESULTADOS E DISCUSSÃO

5.1 ANÁLISE DA FABRICAÇÃO DOS ARAMES

Os arames produzidos pela máquina experimental apresentaram resultados satisfatórios nas análises feitas. Durante o período de fabricação houveram apenas duas rupturas, uma no início da trefilação do arame F0, na bitola 2,2 mm e outra no fim da trefilação da bitola 1,7 mm no arame F14. Em ambos os casos não houveram perdas significativas por se tratar de ruptura na extremidade do arame.

Em relação à circularidade, observou-se uma pequena variação de 0,01 mm nas medições, atribuída à leve recuperação elástica da fita metálica utilizada no processo. Essa recuperação já era esperada e não comprometeu o desempenho do arame utilizado no equipamento. As medições podem ser verificadas no gráfico apresentado na Figura 22.

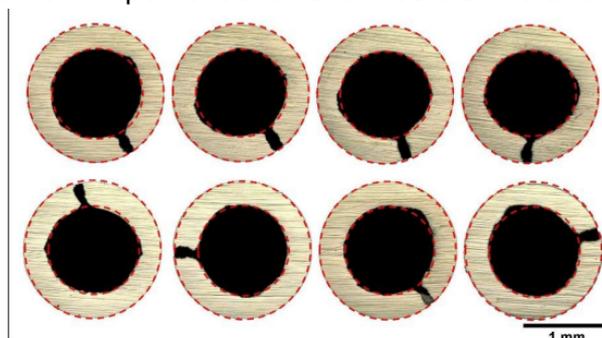
Figura 22 – Diâmetro do arame produzido.



Fonte: Elaborado pelo autor (2023).

O fechamento dos arames foi "de topo" e pode ser verificado na Figura 23, assim como sua circularidade, na qual mostrou-se padrão em toda a seção longa do arame.

Figura 23 – Tipo de fechamento dos arames analisados.



Fonte: Elaborado pelo autor (2023).

A taxa de preenchimento observada nas amostras, conforme evidenciado na Tabela 6, exibe um baixo desvio padrão, indicando uma notável consistência no processo de fabricação dos arames e uma uniformidade na distribuição do fluxo ao longo de toda a sua seção contínua. Essa constância é corroborada pelos resultados obtidos na medição dos diâmetros e da circularidade. Em consequência, dessa forma, os arames produzidos são adequados para utilização nos ensaios de soldagem, minimizando as possibilidades de variações nos resultados apresentados durante o ensaio.

Tabela 6 – Percentuais de Taxa de Fluxo.

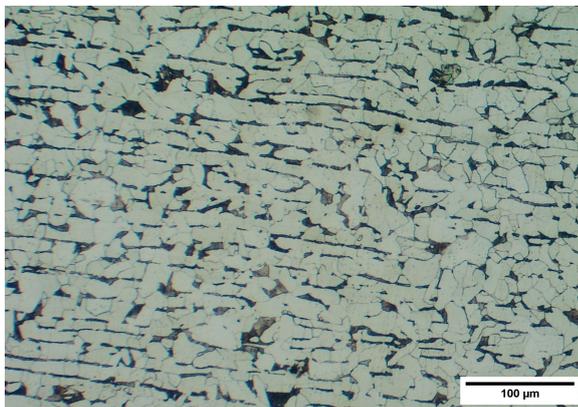
Amostra	Peso com fluxo (g)	Peso sem fluxo (g)	TF(%)	Média	DP
F0.1	1,192	0,909	23,74		
F0.2	1,095	0,781	28,68	25	4
F0.3	1,132	0,890	21,38		
F7.1	1,031	0,748	27,45		
F7.2	1,035	0,769	25,70	26	2
F7.3	1,039	0,792	23,77		
F14.1	1,156	0,908	21,45		
F14.2	1,146	0,970	15,36	15	6
F14.3	1,081	0,984	8,97		

Fonte: Elaborado pelo autor (2023).

5.2 ANÁLISE DAS SOLDAS

A microestrutura do metal de base utilizado no processo é apresentado na Figura 24.

Figura 24 – Microestrutura do Metal de Base usado na solda. Ampliação: 100x.

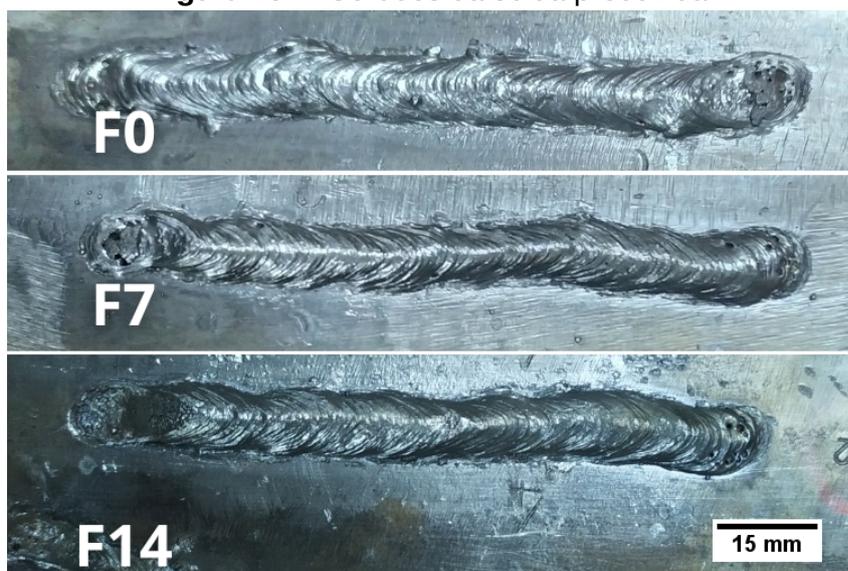


Fonte: Elaborado pelo autor (2023).

O metal de base apresenta uma estrutura padrão do aço A36 laminado a frio, formado por perilitas (mais escuras) em uma matriz ferrítica (mais claras).

Os cordões de solda depositados na chapa obtiveram uma morfologia satisfatória (Figura 25) e os resultados visuais aferiram uma boa estabilidade em todo o processo. Essas características também são influenciadas pelos parâmetros de soldagem, podendo ser otimizados ao longo do tempo. Isso não foi possível devido ao curto período disponível no laboratório.

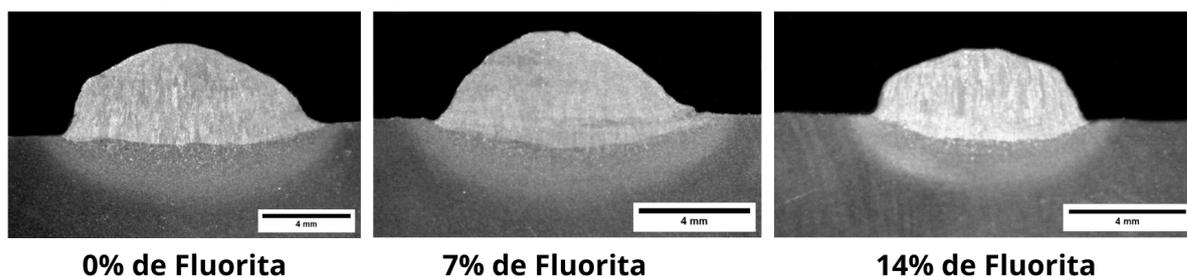
Figura 25 – Cordões da solda produzida.



Fonte: Elaborado pelo autor (2023).

Com base na análise experimental das soldas produzidas, pode-se observar que a macrografia transversal dos cordões de solda não exibe porosidade (Figura 26). Isso evidencia a eficácia da proteção da poça de fusão proporcionada pelos componentes contidos no fluxo do arame.

Figura 26 – Macrografias da seção transversal das soldas realizadas.

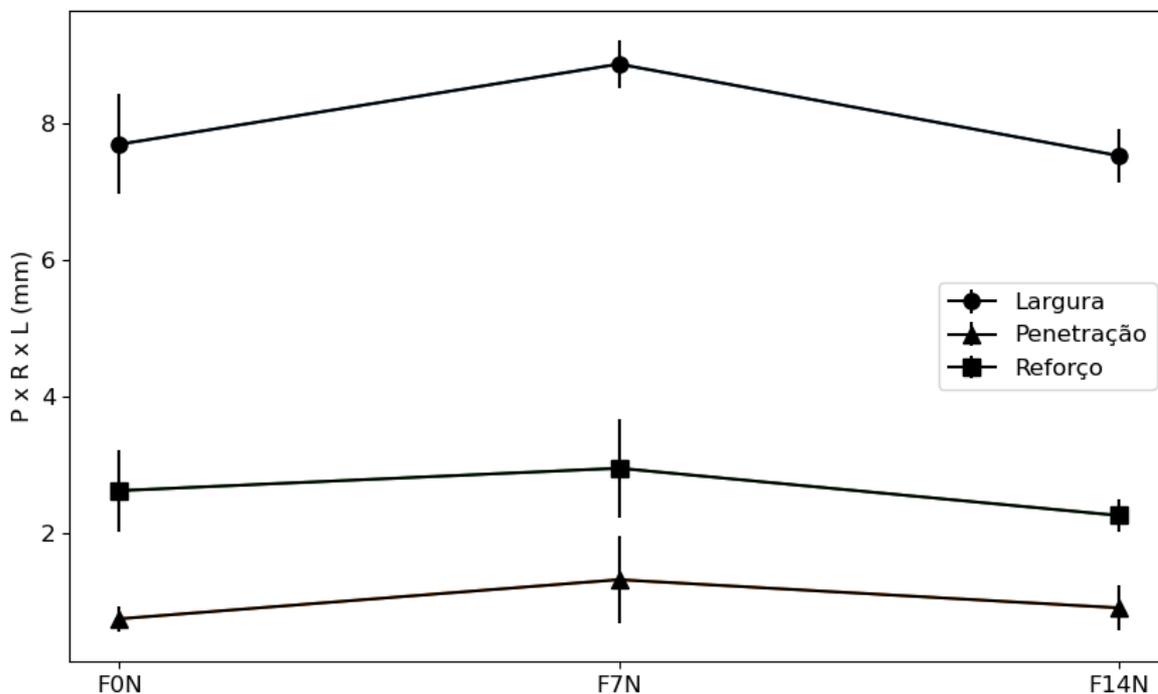


Fonte: Elaborado pelo autor (2023).

A análise da relação da penetração, reforço e largura tiveram resultados positivos, mostrando-se estável nos cordões medidos (Figura 27). Essa proximidade das medições

atestam a estabilidade do fluxo base desenvolvido e a pouca influência do aumento do teor de fluorita nos resultados, conforme a Tabela 7.

Figura 27 – Gráfico Penetração X Reforço X Largura.



Fonte: Elaborado pelo autor (2023).

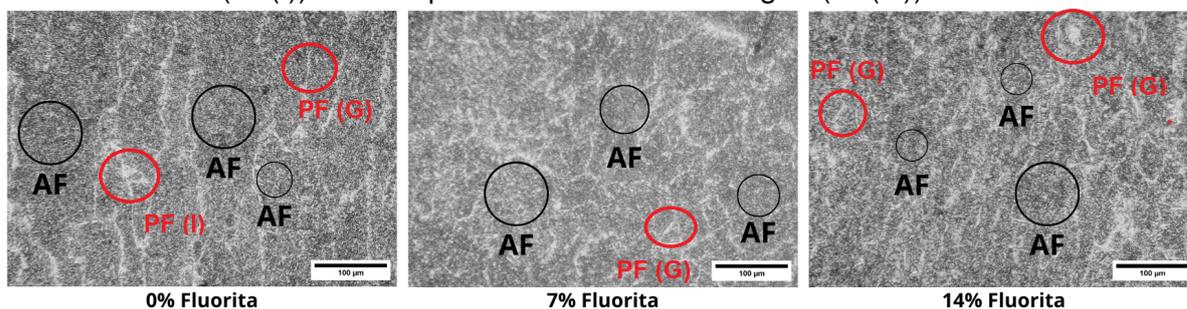
Tabela 7 – Valores médios e desvio padrão das medições de Penetração, Reforço e Largura.

		F0	F7	F14
Penetração	Média	0,7364	1,3108	0,8978
	D.P	0,1886	0,6488	0,3233
Reforço	Média	2,6158	2,9446	2,2520
	D.P	0,6028	0,7279	0,2386
Largura	Média	7,6926	8,8690	7,5270
	D.P	0,7326	0,3489	0,3927

Fonte: Elaborado pelo autor (2023).

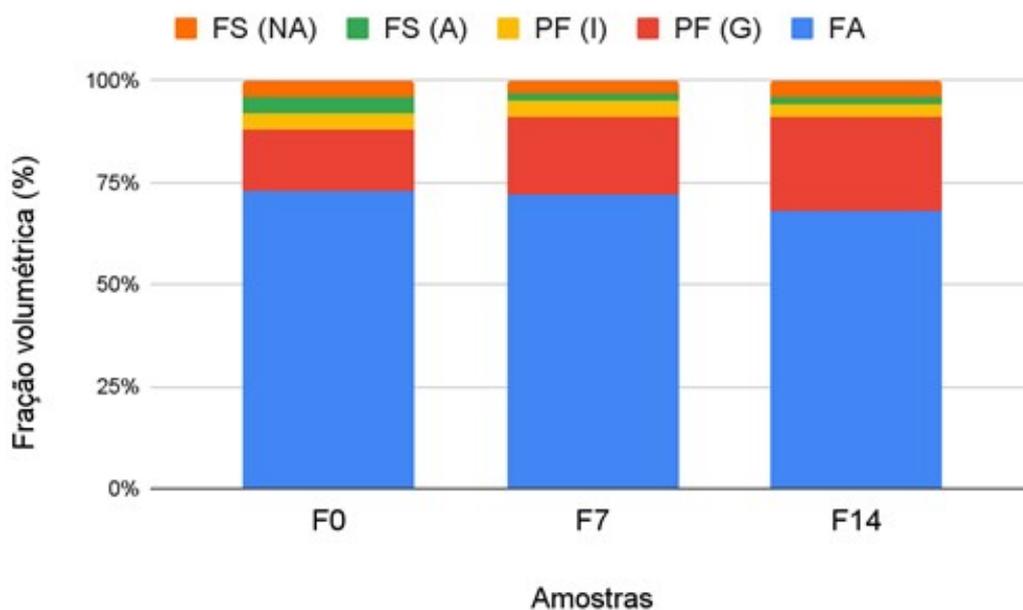
A análise microestrutural da ZF dos três arames apresentaram resultados muito próximo, com uma boa característica visual. As principais microestruturas apresentadas foram compostas de ferrita acircular (AF), ferrita primária de contorno de grão (PF(G)), ferrita primária poligonal intragranular PF (I) e ferrita primária de contorno de grão (PF(G)) (Figura 28) o que atesta ótimos resultados no que diz respeito ao campo da soldagem.

Figura 28 – Microestrutura do metal de solda (ZF) das três amostras trabalhadas. Composta por ferrita acicular (AF), ferrita primária poligonal intragranular (PF(I)) e ferrita primária de contorno de grão (PF(G)). Aumento 100×.



Fonte: Elaborado pelo autor (2023).

Figura 29 – Fração volumétrica de cada constituinte apresentado nas amostras caracterizadas. Ferrita de segunda fase alinhada (FS(A)), ferrita de segunda fase não alinhada (FS(NA)), ferrita primária poligonal intragranular (PF(I)), ferrita primária de contorno de grão (PF(G)) e ferrita acicular (FA).



Fonte: Elaborado pelo autor (2023).

A fração volumétrica de cada constituinte é apresentada no gráfico da Figura 29. É evidenciado uma pequena redução no percentual de ferrita acicular entre o arame F0 e o arame F7, e uma redução mais acentuada entre o F7 e F14, mas que ainda mantém a solda com níveis altos de ferrita acicular.

Os três tipos de arames demonstraram um desempenho notável na formação de ferrita acicular, mesmo no caso do arame que não continha adição de fluorita. Isso sugere que o fluxo base desenvolvido para a composição do arame tem potencial promissor.

Apesar de uma alteração não muito significativa na formação de ferrita acicular em função da fluorita, uma redução no tamanho dos grãos pode ser observada nas

micrografias quando esse ingrediente é adicionado. Esses resultados podem estar relacionados ao fato de que a fluorita atua como um ponto de nucleação heterogênea, aumentando o número de grãos formados.

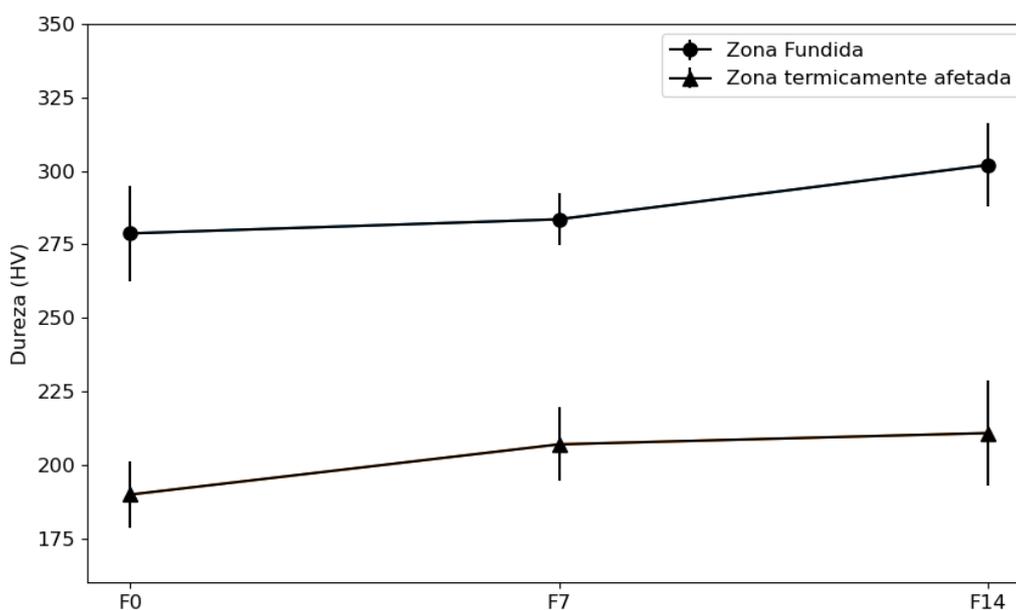
As análises dos resultados do ensaio de dureza Vickers (HV) das amostras estudadas evidencia um leve aumento no valor médio da dureza na ZF conforme há um aumento de fluorita na composição do fluxo. Porém os resultados em relação ao desvio padrão são inconclusivos para esta análise. A Tabela 8 apresenta a média e o desvio padrão dos valores obtidos no ensaio de dureza *Vickers* e a Figura 30 apresenta a evolução da microdureza para cada região soldada.

Tabela 8 – Microdureza apresentada para cada cordão de solda.

Cordão de solda	ZF (HV)	ZTA (HV)	MB (HV)
0% Fluorita	278,7 ± 16	189,8 ± 11	
7% Fluorita	283,5 ± 8	205,5 ± 12	167,23 ± 7
14% Fluorita	301,9 ± 14	210,7 ± 17	

Fonte: Elaborado pelo autor (2023).

Figura 30 – Microdureza apresentada para cada região dos cordões de solda.



Fonte: Elaborado pelo autor (2023).

6 CONCLUSÃO

Os resultados deste estudo revelam diversos resultados positivos acerca da produção de novos insumos de soldagem. Os arames tubulares fabricados em escala laboratorial apresentaram um diâmetro dentro dos limites de especificação, uma circularidade excelente e um fechamento de "topo".

Houve uma distribuição homogênea do fluxo ao longo de todo o arame, com variações insignificantes que não afetam a estabilidade do arame durante o processo de soldagem. Isso confirma a viabilidade da produção desses arames nas condições propostas, além de confirmar a qualidade na produção dos arames utilizando o equipamento experimental de fabricação.

A respeito da morfologia dos cordões de solda produzidos, não foram observados níveis consideráveis de porosidades. Isso indica bons parâmetros de soldagem utilizados no ensaio, além de um bom desempenho do arame e do seu respectivo fluxo, mesmo com adição de fluorita este resultado se manteve.

Um ponto importante que se deve notar é que não foram observadas relações nos resultados da penetração, reforço e largura da solda em relação à variação da concentração de fluorita. Estas características estão mais relacionadas com os parâmetros de soldagem, nos quais se mantiveram sem alterações durante o ensaio.

À medida que as amostras aumentaram a porcentagem de fluorita, houve aumentos substanciais na microdureza, tanto na zona fundida quanto na zona termicamente afetada, tendo um resultado de microestruturas mais refinadas na microscopia do cordão.

Apesar de uma pequena redução da constituição de ferrita acicular de acordo com o aumento da fluorita, houveram bons resultados mecânicos e morfológicos da solda proposta.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

ABBAS, Mahmoud; HAMDY, Ahmed Sayed; AHMED, Essam. The comparison of gas tungsten arc welding and flux cored arc welding effects on dual phase steel. **Materials Research Express**, IOP Publishing, v. 7, n. 3, p. 036523, 2020.

AMARAL, Erriston Campos. **Efeito da adição de PTFE no fluxo de arames tubulares sobre o arco elétrico em soldagem subaquática molhada**. 2021. f. 75. Tese. Doutorado em Engenharia Mecânica – Escola de Engenharia, Universidade Federal de Minas Gerais.

ARAÚJO, Márcia Regina Vieira de. **Caracterização microestrutural do metal de solda depositado por arco submerso em chapas de aço-carbono estrutural**. 2006. f. 118. Dissertação. Mestrado em Engenharia Mecânica. – Faculdade de Engenharia de Ilha Solteira, Universidade Estadual Paulista (Unesp).

BAILEY, Norman. **Weldability of ferritic steels**. Primeira Edição. Inglaterra: Woodhead Publishing, 1994. p. 271.

BAILEY, Norman. **Welding steels without hydrogen cracking**. Cambridge, Inglaterra: Woodhead Publishing, 1993. p. 271.

BEMBENEK, Michał; PRYSYAZHNYUK, Pavlo; SHIHAB, Thaer; MACHNIK, Ryszard; IVANOV, Olexandr; ROPYAK, Liubomyr. Microstructure and Wear Characterization of the Fe-Mo-BC—Based Hardfacing Alloys Deposited by Flux-Cored Arc Welding. **Materials**, v. 15, n. 14, p. 50–74, 2022.

BHADESHIA, Harshad. Bainite in steels: transformation, microstructure and properties. **London: The Institute of Materials, University of Cambridge**, v. 16, p. 377–382, 2001.

DEBROY, T. L.; DAVID, S. A. Physical processes in fusion welding. **Reviews of modern physics**, APS, v. 67, n. 1, p. 85, 1995.

FERREIRA. **Fabricação de eletrodo arame tubular auto protegido composto por tubo de aço carbono e fluxo contendo Fe-Cr-Ni para a formação de aço inoxidável como metal de solda na soldagem subaquática de aço carbono A36**. 2020. f. 101. Dissertação. Mestrado em Engenharia Mecânica – Escola de Engenharia, Universidade Federal de Minas Gerais.

FERREIRA, Jeferson Goncalves. **Estudo dos sinais elétricos no processo de soldagem por revestimento com arame tubular pulsado visando determinar a estabilidade do arco**. 2022. f. 95. Dissertação. Mestrado em Engenharia Mecânica – Programa de pós-graduação em Engenharia Mecânica, Universidade federal do paraná.

FORTES, C. Arames Tubulares. **Literatura ESAB BR**, 51p, 2004.

GARCIA, Regina Paula; SCOTT, Américo. Uma metodologia para análises comparativas da capacidade produtiva entre arames maciços (MIG/MAG) e tubulares (Eletrodo Tubular). **Soldagem & Inspeção**, SciELO Brasil, v. 16, n. 2, p. 146–155, 2011.

GOMES, Enedina Beatriz. **Análise do comportamento da soldagem por Curto-Circuito aplicado ao processo Eletrodo Tubular através da Metodologia Taguchi**. 2020. f. 99. Dissertação de Mestrado – Universidade Federal de Itajubá.

GUO, Jing; TANG, Cong; ROTHWELL, Glynn; LI, Lisa; WANG, Yun-Che; YANG, Qingxiang; REN, Xuejun. Welding of high entropy alloys—A review. **Entropy**, MDPI, v. 21, n. 4, p. 431, 2019.

GUY, Blaine. **Out-of-Position Welding: GMAW vs. FCAW-G**. v. 100. Miami, FL, UNITED STATES: AMER WELDING, 2021. p. 36–38.

HÖFER, Kevin; KUSCH, Mario; MAYR, Peter. Flux cored arc welding – determination and reduction of fume emission rates. **Welding International**, v. 35, n. 4-6, p. 138–144, 2021.

JEFFUS, Larry. **Welding: Principles and Applications**. 8^a. New York: Delmar, 2016.

JOAQUIM, Roberto. **Processo de soldagem por arame tubular**. Rio de Janeiro, 2009. Acesso: 17 out. 20223. Disponível em: infosolda.com.br/wp-content/uploads/Downloads/Artigos/processos_solda/processo-de-soldagem-por-arama-tubular.pdf.

KIL, Woong; SHIN, Myeong-jun; BANG, Kook-soo. Effects of fluoride in the flux on hydrogen content in weld metal and operating behavior in FCAW-S. **Journal of Welding and Joining**, v. 35, n. 5, p. 65–70, 2017.

KIM, J. B.; LEE, T. H.; SOHN, I. Effect of Compositional Variation in TiO₂-Based Flux-Cored Arc Welding Fluxes on the Thermo-physical Properties and Mechanical Behavior of a Weld Zone. **Metallurgical and Materials Transactions A**, Springer, v. 49, p. 2705–2720, 2018.

KOU, Sindo. Welding metallurgy. **New Jersey, USA**, v. 431, n. 446, p. 223–225, 2003.

ŁABANOWSKI, Jerzy; FYDRYCH, Dariusz; ROGALSKI, Grzegorz. Underwater Welding—a review. **Advances in materials Science**, v. 3, p. 10–2478, 2008.

LIMA, Eduardo José; CASTRO, Carlos Alberto Carvalho; BRACARENSE, Alexandre Queiroz; CAMPOS, Mario Fernando Montenegro. Determinação da relação entre parâmetros de soldagem largura da poça e aspecto do cordão de solda utilizando câmera de alta velocidade. **Soldagem Inspeção**, p. 182–189, 2005.

LIMA LESSA, Cleber Rodrigo de. **Soldagem FHPP-processo e metalurgia nas transformações das fases de um aço C-Mn**. 2011. f. 99. Dissertação. Mestrado em Engenharia de Minas, Metalúrgica e de Materiais – Programa de Pós-Graduação em Engenharia de Minas, Metalúrgica e de Materiais (PPGE3M). Universidade Federal do Rio Grande do Sul.

LUNDIN, C. D. Dissimilar metal welds-transition joints literature review. **Welding Journal**, v. 61, n. 2, p. 58–63, 1982.

LUZ, T. S. **Influência do gás de Proteção sobre as características operacionais de soldagem com arame tubular**. 2000. f. 95. Monografia. Bacharelado em Engenharia Mecânica. – Universidade federal do Ceará.

MA, Qiang; LI, Hongliang; LIU, Shixiong; LIU, Duo; WANG, Pengfei; ZHU, Qiang; LEI, Yucheng. Comparative Evaluation of Self-Shielded Flux-Cored Wires Designed for High Strength Low Alloy Steel in Underwater Wet Welding: Arc Stability, Slag Characteristics, and Joints' Quality. **Journal of Materials Engineering and Performance**, Springer, v. 31, n. 7, p. 5231–5244, 2022.

MARQUES, Paulo Villani; MODENESI, Paulo José. Algumas equações úteis em soldagem. **Soldagem & Inspeção**, v. 19, n. 1, p. 91–101, 2014.

MODENESI, Paulo José; BRACARENSE, Alexandre Queiroz; MARQUES, Paulo Villani. **Soldagem: fundamentos e tecnologia**. 2. ed. Belo Horizonte: Editora UFMG, 2005. p. 95.

OLIVEIRA, Bernardo Venturini. **Desenvolvimento, construção e montagem de equipamento para fabricação do arame tubular para soldagem**. 2010. f. 55. Monografia (Trabalho de Graduação) – Escola de Engenharia, Universidade Federal de Minas Gerais, Belo Horizonte.

OLSON, D. L.; SIEWERT, T. A.; LIU, S.; EDWARDS, G. R. **ASM handbook: welding, brazing, and soldering**. 6. ed. [S. l.]: ASM international, 1993.

PADHY, Girish Kumar; KOMIZO, Yu-ichi. Diffusible hydrogen in steel weldments: A status review. **Transactions of JWRI**, v. 42, n. 1, p. 39–62, 2013.

PANNACE, Herberh Vinicius Mendrot. **Soldagem por arco submerso (SAW) em comparação a soldagem por arame tubular (FCAW)**. 2018. f. 55. Trabalho de graduação. Bacharelado em Engenharia Mecânica – Universidade de Taubaté.

PESSOA, Ezequiel Caires Pereira; LIU, Stephen. The state of the art of underwater wet welding practice: Part 2. **Welding Journal**, v. 100, p. 171–182, 2021.

PRATIKNO, Herman; ABIYYUDA, Hafizh; DHANISTA, Wimala Lalitya. Comparative Analysis of GTAW, GMAW, and FCAW Welding Results on A36 Steel Against Tensile Test and Macrostructure. **International Journal of Offshore and Coastal Engineering (IJOCE)**, v. 6, n. 1, p. 19–22, 2022.

SOUZA, Claudio Ivanei de; FERRARESI, Valtair Antonio. Análise comparativa dos processos de soldagem GMAW e FCAW com transferência metálica por curto-circuito na posição horizontal. **Soldagem & Inspeção**, v. 18, n. 3, p. 268–280, 2013.

TATAGIBA, Luiz Claudio Soares; GONÇALVES, Renata Barbosa; PARANHOS, Ronaldo. Tendências no desenvolvimento de gases de proteção utilizados na soldagem MIG/MAG. **Soldagem & Inspeção**, v. 17, p. 218–228, 2012.

VAZ, Cláudio Turani; BRACARENSE, Alexandre Queiroz; REZENDE, Leonardo Schiavo de; MENEZES, Pedro Henrique Ribeiro. Arames Tubulares Celulósicos: Influência da Adição de Polímeros sobre a Estabilidade do Processo e Propriedades do Metal de Solda Produzido. **Soldagem & Inspeção**, SciELO Brasil, v. 22, n. 4, p. 374–388, 2017.

VILLEGAS, Randolpho; REDJAIMIA, Abdelkrim; CONFENTE, Mario; PERROT-SIMONETTA, Marie-Therese. Fractal nature of acicular ferrite, and fine precipitation in medium carbon micro-alloyed forging steels. **New Developments on Metallurgy and Applications of High Strength Steels.**, v. 1, n. 151, p. 12–20, 2005.

WIDGERY, David. **Tubular wire welding**. Primeira Edição. Inglaterra: Woodhead Publishing Limited, 1994. p. 12–38.

ZHANG, Xin; GUO, Ning; XU, Changsheng; DU, Yongpeng; CHEN, Bo; FENG, Jicai. Influence of CaF₂ on microstructural characteristics and mechanical properties of 304 stainless steel underwater wet welding using flux-cored wire. **Journal of Manufacturing Processes**, Elsevier, v. 45, p. 138–146, 2019.