

UNIVERSIDADE FEDERAL DE MINAS GERAIS
Faculdade de Engenharia e Ciências Humanas
Programa de Pós-graduação em Engenharia de Soldagem

Adriano Ribeiro Marinho

**AVALIAÇÃO DE FLUXOS PARA SOLDAGEM SAW TWIN ARC EM ALTAS
VELOCIDADES DE JUNTAS EM ÂNGULO PARA FABRICAÇÃO DE
VIGAS METÁLICAS**

Belo Horizonte
2025

Adriano Ribeiro Marinho

**AVALIAÇÃO DE FLUXOS PARA SOLDAGEM SAW TWIN ARC EM ALTAS
VELOCIDADES DE JUNTAS EM ÂNGULO PARA FABRICAÇÃO DE VIGAS
METÁLICAS**

Trabalho de Conclusão de Curso apresentado
ao Curso de Pós-Graduação em Engenharia de
Soldagem da Universidade Federal de Minas
Gerais, como requisito parcial para obtenção do
título de Especialista em Soldagem.

Área de concentração: Engenharia Mecânica

Orientador: Alexandre Queiroz Bracarense

Belo Horizonte
2025

M338a	Marinho, Adriano Ribeiro. Avaliação de fluxos para soldagem SAW <i>twin arc</i> em altas velocidades de juntas em ângulo para fabricação de vigas metálicas [recurso eletrônico] / Adriano Ribeiro Marinho. – 2025. 1 recurso online (69 f. : il., color.) : pdf. Orientador: Alexandre Queiroz Bracarense. Monografia apresentada ao Curso de Especialização em Engenharia de Soldagem da Universidade Federal de Minas Gerais, como requisito para a obtenção do título de Especialista em Soldagem. Anexos: f. 67-69. Bibliografia: f. 65-66. 1. Soldagem. 2. Processos de fabricação. 3. Estruturas metálicas. 4. Vigas (Construção). I. Bracarense, Alexandre Queiroz. II. Universidade Federal de Minas Gerais. Escola de Engenharia. III. Título. CDU: 621.791
-------	--



UNIVERSIDADE FEDERAL DE MINAS GERAIS

CURSO DE SOLDAGEM



ATA DA DEFESA DA MONOGRAFIA DO ALUNO ADRIANO RIBEIRO MARINHO

Realizou-se, no dia 30 de janeiro de 2025, às 16:30 horas, PREFERENCIALMENTE ONLINE (Plataforma TEAMS), da Universidade Federal de Minas Gerais, a defesa de monografia, intitulada **AVALIAÇÃO DE FLUXOS PARA SOLDAGEM SAW TWIN ARC EM ALTAS VELOCIDADES DE JUNTAS EM ÂNGULO PARA FABRICAÇÃO DE VIGAS METÁLICAS**, apresentada por ADRIANO RIBEIRO MARINHO, número de registro 2022693358, graduado no curso de ENGENHARIA MECÂNICA, como requisito parcial para a obtenção do certificado de Especialista em SOLDAGEM, à seguinte Comissão Examinadora: Prof(a). Prof. Dr. Alexandre Queiroz Bracarense - Orientador (UFMG), Prof(a). Matheus Baptista Albertoni (ESAB - Especialista de Produtos), Prof(a). Rodrigo Sanches Oliveira (ESAB).

A Comissão considerou a monografia:

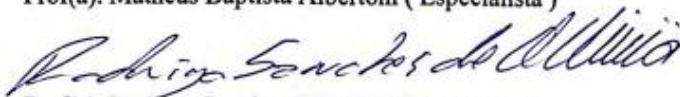
☒ Aprovada Nota **95**

☐ Reprovada

Finalizados os trabalhos, lavrei a presente ata que, lida e aprovada, vai assinada por mim e pelos membros da Comissão.
Belo Horizonte, 30 de janeiro de 2025.


Prof(a). Prof. Dr. Alexandre Queiroz Bracarense (Doutor)


Prof(a). Matheus Baptista Albertoni (Especialista)


Prof(a). Rodrigo Sanches Oliveira (Especialista)

AGRADECIMENTOS

Em primeiro lugar, deixarei aqui registrado o meu agradecimento e fé a Deus por por sua infinita bondade e amor, que sempre me protegeram e me guiaram em minha jornada acadêmica. Este TCC é uma expressão da gratidão que sinto por todas as bênçãos que recebi de sua mão generosa.

Agradeço a minha esposa Jordana por toda sua compreensão e motivação ao longo da realização deste curso e pelo apoio em todos os momentos que compartilhamos na conclusão de mais uma etapa importante em minha vida. Agradeço aos meus pais, Adercio e Luciana, por todo o carinho e por nunca terem medido esforços para me proporcionar um ensino de qualidade que foram base para chegar até aqui.

Agradeço à UFMG e ao laboratório, instrutores e professores do LRSS pelos ensinamentos durante esses anos de formação, assim como à direção e equipe administrativa pela infraestrutura pelo suporte e recursos disponibilizados, bem como pelo apoio contínuo que nos permitiu alcançar nossos objetivos acadêmicos.

Por final, deixo meus sinceros agradecimentos à ESAB Brasil por toda a estrutura fornecida para realização deste trabalho. Agradeço especialmente às equipes dos departamentos de desenvolvimento de produtos, aplicações e processos, e aos departamentos de qualidade e laboratório químico, pela colaboração e por todas as sugestões e trocas de experiências durante os experimentos.

RESUMO

A demanda industrial por estruturas metálicas requer técnicas e processos com alta capacidade de mecanização devido aos prazos de entrega apertados, uniformidade dos níveis de qualidade e a crescente falta de mão de obra qualificada no mercado brasileiro. A sucessiva implantação de processos de fabricação mais produtivos depende de técnicas de união eficientes, como a soldagem por arco submerso (SAW). Este método tornou-se amplamente utilizado em soldas longitudinais para confecção de componentes estruturais, tais como estruturas treliçadas, estacas e vigas metálicas. Três importantes variáveis ditam o comportamento das propriedades mecânicas, dimensionamento e modificações metalúrgicas da junta soldada pelo processo SAW: o arame, o fluxo e os parâmetros de soldagem. Os fabricantes de consumíveis apresentam uma série de combinações entre arame e fluxos de soldagem, definidos a partir de suas características físicas e químicas, além da sua contribuição para as propriedades mecânicas da junta. Desta forma, o presente trabalho realiza um estudo comparativo entre quatro fluxos, na condição de soldagem Twin Arc em altas velocidades de juntas em ângulo para a fabricação de vigas metálicas de aço estrutural ASTM A36. As avaliações envolveram a observação do comportamento dos fluxos utilizando-se de critérios qualitativos, como linearidade do cordão obtido, destacabilidade da escória, presença de escória secundária e descontinuidades superficiais como mordedura, porosidade e martelamento do cordão; e dimensionais, como as seções de solda angulares e pernas de soldagem, através da análise por macrografia dos cordões otimizados para os quatro fluxos em cada velocidade de soldagem. O trabalho ainda propõe uma verificação quanto ao custo-benefício dos consumíveis nacionais e importados para o mercado interno.

Palavras-chave: SAW Twin-arc; fluxos de soldagem; soldagem de alta velocidade; solda em ângulo.

ABSTRACT

The industrial demand for steel structures requires techniques and processes with a high level of mechanization due to tight lead times, consistent quality levels and the increasing shortage of skilled workers in the Brazilian market. The continuous application of more productive manufacturing processes depends on efficient joining techniques, such as submerged arc welding (SAW). This method has become widely used in longitudinal welds for making structural components, such as truss structures, piles and steel beams. Three important variables determine the behavior of mechanical properties, size and metallurgical changes of joints welded by SAW: the wire, the flux and the welding parameters. Consumable manufacturers offer a variety of combinations between welding wire and flux, defined based on their physical and chemical characteristics, as well as their contribution to the mechanical properties of the joint. The present study compares four welding fluxes using Twin Arc welding at high speeds in T joints for fabricating ASTM A36 structural steel beams. The tests examined the behavior of the fluxes using qualitative factors, such as the linearity of the weld bead obtained, slag detachability, presence of secondary slag and surface discontinuities such as undercut, porosity and hammering of the weld bead; and dimensional factors, such as the angular weld sections and weld legs, through macrographic analysis of optimized weld beads for the four fluxes at each welding speed. The work also proposes a cost-benefit analysis of national and imported consumables for internal market.

Palavras-chave: SAW Twin-arc; welding fluxes; 2F high speed welding.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 - Desenho esquemático do processo de soldagem SAW.....	14
Figura 2 - Aspectos dos grãos dos fluxos fundidos (a) e aglomerados (b)	18
Figura 3 - Comportamento do fluxo ativo e neutro	19
Figura 4 - Sistema de classificação de consumíveis para a soldagem SAW conforme AWS	22
Figura 5 - Representação esquemática do ciclo térmico na soldagem em um só passe	24
Figura 6 - Macroestrutura esquemática da seção transversal de uma junta soldada e sua relação com as temperaturas de pico. A – ZF; B – ZTA e C – MB	25
Figura 7 - Esquema do processo SAW Twin com arames geminados	28
Figura 8 - Taxa de deposição (kg/h) em função da corrente de soldagem CC+/CC- para soldagem SAW convencional x SAW Twin Arc	29
Figura 9 - Efeito da intensidade da corrente sobre a penetração	31
Figura 10 - Efeito da polaridade da corrente sobre a penetração.....	31
Figura 11 - Efeito da tensão de soldagem no perfil do cordão	32
Figura 12 - Influência da camada de fluxo de soldagem na aparência do cordão de solda.....	33
Figura 13 - Influência da velocidade de soldagem na penetração, geometria e descontinuidades	34
Figura 14 - Influência do parâmetro stick-out (extensão) na penetração	35
Figura 15 - Efeito do posicionamento do arame na forma do reforço de solda em juntas de ângulo.....	36
Figura 16 - Variação do fator de concentração de tensões com a penetração da solda	37
Figura 17 - Influência do alinhamento do arame em relação a junta em ângulo horizontal.....	38
Figura 18 - Classificação dos perfis soldados conforme ABNT 5884	40
Figura 19 - Seções desejadas, aceitáveis e inaceitáveis de soldas de filete	41
Figura 20 - Conjunto SAW ESAB: A6S + PEK + LAF 1251 + Caneta modificada	45
Figura 21 - Posição de soldagem (a), modelo de viga (b) com 40" (Aprox. 1 m) de comprimento e dimensões do perfil I (c) utilizados.....	47
Figura 22 - Espectrômetro de Raios-x – modelo: Axios-DY1223 – marca: Panalytical (a) e amostra compactada para avaliação (b)	51
Figura 23 - Comportamento dos fluxos quanto à porosidade em diferentes velocidades de soldagem	55
Figura 24 - Variáveis típicas para dimensionar uma poça de fusão: deslocamento do metal fundido, X_m (a) e ponto de solidificação ao longo da borda da poça de fusão, X_s	56
Figura 25 - Método de deformação da fonte de calor com um grupo de eletrodos finos	57
Figura 26 - Comportamento dos fluxos quanto à destacabilidade de escória (a) e presença de escória secundária (b) em diferentes velocidades de soldagem.....	58
Figura 27 - Avaliação qualitativa dos fluxos quanto ao comportamento em diferentes níveis de velocidade	59

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 - Composição química de eletrodos para soldagem SAW.....	16
Tabela 2 - Influência da corrente e tensão de soldagem na transferência de Cr e Mo de um fluxo ativo na soldagem com eletrodo de aço não ligado	20
Tabela 3 - Comportamento de diferentes fluxos de soldagem	21
Tabela 4 - Eficiências típicas dos processos ao arco	24
Tabela 5 - Rendimento térmico para alguns processos de soldagem	26
Tabela 6 - Taxas de deposição típicas para a soldagem com um arame e com arco geminado para uma extensão de eletrodo (stick-out) de 30 mm.....	30
Tabela 7 - Tipos de perfis baseados em sua relação d/bf	40
Tabela 8 - Dimensões da solda em ângulo conforme ABNT NBR 5884.....	42
Tabela 9 - Tamanho mínimo da solda de filete conforme AWS D1.1	42
Tabela 10 - Caracterização e propriedades mecânicas dos fluxos de soldagem utilizados.....	44
Tabela 11 - Propriedades mecânicas e composição química do Aço ASTM A-36	46
Tabela 12 - Composição Química dos Fluxos de Soldagem	51
Tabela 13 - Granulometria dos fluxos de soldagem	52
Tabela 14 - Conjunto de parâmetros e avaliação dos fluxos em 140 cm/min	53
Tabela 15 - Conjunto de parâmetros e avaliação dos fluxos em 160 cm/min	53
Tabela 16 - Conjunto de parâmetros e avaliação dos fluxos em 180 cm/min	53
Tabela 17 - Conjunto de parâmetros e avaliação dos fluxos em 200 cm/min	54
Tabela 18 - Dimensões da solda angular para os cordões selecionados	54
Tabela 19 - Avaliação das seções de solda obtidas.....	60
Tabela 20 - Comparativo de custos para os fluxos nacionais e importados	62

SUMÁRIO

1.	INTRODUÇÃO	10
2.	DESENVOLVIMENTO TEÓRICO	13
2.1	Soldagem por Arco Submerso (SAW)	13
2.1.1	Consumíveis de soldagem SAW	15
2.1.2	Fatores Determinantes para seleção do processo SAW	23
2.1.3	Variações do processo SAW:.....	27
2.1.4	SAW Twin-arc	28
2.2	Variáveis do processo SAW:	30
2.3	Projeto e preparação da junta.....	35
2.4	Soldagem de estruturas metálicas.....	39
2.4.1	Dimensionamento da solda em ângulo	42
3.	METODOLOGIA DE PESQUISA	43
3.1	Materiais e métodos	45
3.1.1	Preparação e soldagem das vigas	46
3.1.2	Avaliação visual das soldas em ângulo	48
3.1.3	Corte e preparação das amostras para macrografia	48
4.	RESULTADOS OBTIDOS.....	50
4.1	Avaliação dos custos envolvidos: Fluxos nacionais x importados	61
5.	CONCLUSÕES	63
6.	REFERÊNCIAS	65

1. INTRODUÇÃO

O crescimento contínuo da indústria nacional demanda uma série de investimentos, dentre eles o foco em desenvolver novos empreendimentos em todos os segmentos. Associado a este fato, adicionam-se desafios como o prazo de entrega curto, falta de mão de obra qualificada e altos níveis de controle de qualidade. A automação de processos de fabricação se consolidou como uma técnica útil para atingir tais requisitos, possibilitando ainda a redução dos tempos de manufatura e custos finais (MAROUÇO, 2014).

A soldagem é um importante processo de união de metais, largamente utilizado na indústria. Possui diversas aplicações, desde a fabricação de microeletrônicos até a de embarcações e outras estruturas pesadas, justificada por inúmeras vantagens que este método oferece em relação aos demais, uma delas a continuidade proporcionada às juntas soldadas (MARQUES et al., 2011). A expansão do uso da soldagem na fabricação devido ao custo competitivo e grande versatilidade através das inúmeras variações de processos, demonstrou a necessidade de maiores estudos sobre os fenômenos físicos e químicos envolvidos (MAROUÇO, 2014). Além disso, desde a década de 70, discussões sobre a implantação de métodos mais produtivos e automatizados são um dos principais temas em meio a comunidade técnica e industrial no ramo da soldagem (MAROUÇO, 2014).

O processo de Soldagem por Arco Submerso (SAW) é uma técnica importante para segmentos industriais que demandam alta produtividade na união de materiais espessos, isto é, elevadas taxas de deposição e penetração da solda (SHARMA; CHHIBBER, 2020), como as indústrias eólicas, naval, offshore, dentre outras. É aplicado na soldagem de diversas ligas metálicas, como o aço carbono, aços inoxidáveis, aços de baixa liga e aços especiais.

O SAW é uma excelente tecnologia para a fabricação de vigas maciças, estruturas treliçadas, estacas e outros componentes críticos para fabricação de edifícios e pontes, elementos estruturais importantes para o desenvolvimento da infraestrutura urbana. O processo SAW mecanizado ou automatizado é aplicado para produzir soldas longitudinais ou circunferenciais para a união de chapas de aços estruturais. Neste ramo, o aumento da velocidade de soldagem é uma

busca incessante, pois permite o aumento da eficiência das linhas de produção (OHARA et al., 1986).

Três importantes variáveis podem afetar de forma significativamente as propriedades mecânicas do metal de solda pelo processo SAW: o arame, o fluxo e os parâmetros de soldagem. A interação entre estas variáveis durante a soldagem ditam as modificações metalúrgicas da junta (SHARMA; CHHIBBER, 2020). Os fluxos têm uma função multifacetada em todo o processo de soldagem e são definidos a partir de suas características e desempenho [FORTES E ARAUJO, 2004; GUPTA et al., 2024]. Podem influenciar a geometria do cordão, no refino do metal de solda, proteger o cordão de solda (GUPTA et al., 2024), controlar a transferência de elementos de liga durante a soldagem e a destacabilidade da escória, que está relacionada com as propriedades físico-químicas do fluxo (WANG et al., 2023).

Tendo em vista este cenário, o presente trabalho apresenta a aplicação de diferentes fluxos na soldagem por arco submerso na configuração TWIN ARC em um modelo convencional de viga metálica de aço estrutural ASTM A36. O comportamento destes fluxos em níveis de velocidade de soldagem distintas será avaliado sob diferentes aspectos. O estudo abrange uma observação visual qualitativa das juntas soldadas, comparando-as utilizando critérios como a linearidade do cordão obtido, destacamento da escória, presença de escória secundária e descontinuidades superficiais como mordedura, porosidade e martelamento do cordão.

As dimensões da solda angular também serão examinadas, sobretudo o comprimento das pernas do filete soldado, tendo como referências os padrões e normas de soldagem estruturais ABNT 5884 e AWS D1.1. Ensaios de propriedades mecânicas serão efetuados de acordo com a norma ASME II Part C. Além disso, o preço por quilo dos fluxos nacionais e importados serão avaliados, com o intuito de apresentar o custo-benefício de cada solução para o mercado interno brasileiro.

A pesquisa será dividida em três etapas. A primeira etapa abordará o desenvolvimento e referencial teórico, no qual o processo de soldagem será descrito, bem como seus principais parâmetros e variações, a classificação, características e ensaios de propriedades mecânicas dos fluxos e arames de acordo com as normas de especificações de consumíveis de soldagem. Esta

etapa também descreverá as configurações típicas de vigas estruturais, seu dimensionamento e a seleção do modelo típico para o estudo. A segunda etapa apresentará a metodologia utilizada para o desenvolvimento dos testes de soldagem, os parâmetros fixos e variáveis, coleta de dados e observações a serem realizadas. Por fim, as duas últimas etapas irão trazer as discussões sobre os resultados obtidos e as conclusões sobre o trabalho.

2. DESENVOLVIMENTO TEÓRICO

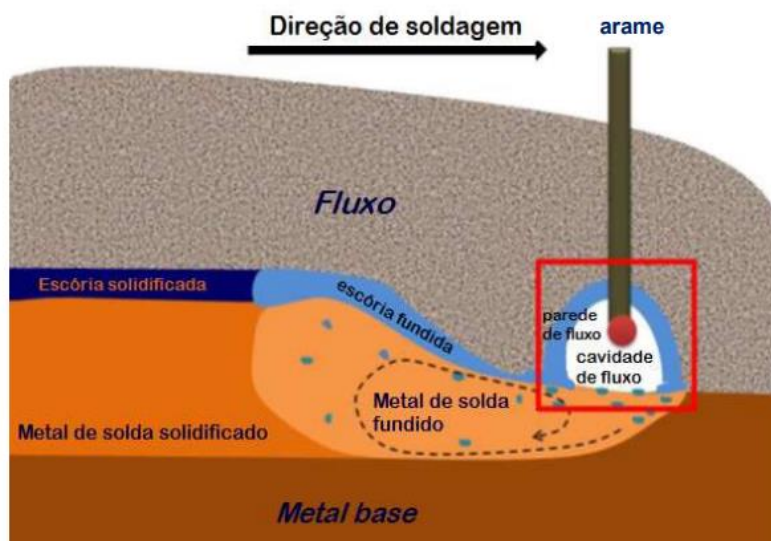
2.1 Soldagem por Arco Submerso (SAW)

O processo de soldagem por arco submerso (*Submerged Arc Welding*) é um dos diversos métodos de soldagem no qual o calor necessário para fundir o metal é gerado por um arco elétrico estabelecido entre um eletrodo de tira ou fio consumível de metal sólido (ou com núcleo) e a peça de trabalho. Diferentemente de outros processos como o eletrodo revestido (SMAW), MIGMAG (GMAW) ou arame tubular (FCAW), o arco elétrico, a poça de fusão e a ponta do arame permanecem cobertos, ou submersos, por uma camada de um material granulado denominado fluxo de soldagem (JUNIOR, 2018; FORTES E ARAUJO, 2012; GUPTA et al., 2024).

O processo SAW é um dos mais empregados na união de chapas espessas para obter uma alta taxa de deposição e penetração de solda. É largamente aplicado em setores que demandam alta produtividade (WANG et al., 2023; MAROUÇO, 2014), como a fabricação de grandes estruturas metálicas, em setores caracterizados por engenharia pesada, incluindo a fabricação de tubulações, vasos de pressão, construção naval e offshore, segmentos ferroviários, petrolíferos, petroquímicos e estruturas eólicas. Pelo fato de ser mecanizado ou automatizado, possui grande eficiência e altos ciclos de trabalho, permite o trabalho com correntes de soldagem alternada (CA) ou contínua (CC) de até 2000 A (FORTES E ARAUJO, 2012; CASTRO, 2017).

Uma vez aberto o arco, os consumíveis do processo são fornecidos continuamente para a região a ser soldada. O metal fundido se solidifica e forma o cordão de solda e parte fundida do fluxo forma a escória, que sobrenada a poça de fusão e se solidifica à medida que o arco se afasta, resultando em uma camada protetora que evita a contaminação do cordão e reduz sua velocidade de resfriamento (MARQUES et al., 2011). A figura 1 apresenta um desenho esquemático do processo SAW.

Figura 1 - Desenho esquemático do processo de soldagem SAW



Fonte: (CASTRO, 2017)

A fonte de energia empregada fornece a corrente contínua (CC) ou corrente alternada (CA), em níveis de até 2000 A, em um ciclo de trabalho de 100%. As fontes podem apresentar as configurações de tensão constante (CV) e/ou corrente constante (CI), a depender do diâmetro do arame em trabalho. O controle oferecido pela fonte para manter a corrente constante pode ser realizado de duas maneiras: pelo ajuste da tensão de soldagem ou pela variação da taxa de alimentação do arame. No primeiro caso, se em um curto período, a corrente fundir o arame a uma taxa maior que a de sua alimentação, a distância entre o arame e a peça (stick-out) aumentará, aumentando a tensão de soldagem. Por outro lado, se o arame for alimentado mais rapidamente que sua taxa de fusão, a distância entre o arame e a peça diminuirá, e a tensão de soldagem será reduzida (FORTES, 2009). A corrente e tensão de soldagem podem ser mantidas constantes, com o emprego de uma unidade de controle que, automaticamente, varie a taxa de alimentação do arame à medida que a tensão de soldagem se altere.

Em uma fonte CV, a tensão do arco é mantida pela fonte. A corrente do arco é controlada pela velocidade de alimentação do arame, de modo que um aumento neste parâmetro produzirá um aumento da corrente. Desta forma, o

sistema de alimentação do arame é simplificado para um dispositivo de velocidade constante (FORTES, 2009).

A tocha de soldagem, comumente denominada caneta no processo SAW, consiste em um bico de contato deslizante (mandíbula) de liga de cobre, de um sistema para fixação do cabo de corrente e de um suporte isolante. As mandíbulas devem ser adequadas para cada diâmetro de arame utilizado, garantindo assim um contato elétrico adequado (MARQUES et al., 2011).

O alimentador de arame consiste em um suporte para posicionamento da bobina do eletrodo, um motor de corrente contínua com controlador de velocidade de giro e um conjunto de roletes de alimentação para correta fixação do eletrodo. Já o alimentador do fluxo, consiste em um porta-fluxo, mangueira condutora e um bocal de saída, este acoplado na caneta de soldagem, que pode ser concêntrico ou colocado á frente desta. Geralmente o fluxo é alimentado por gravidade (MARQUES et al., 2011). Sistemas de recuperação de fluxo são dispositivos que aspiram o fluxo não fundido durante a operação e o devolvem ao silo de fluxo ou a um outro recipiente de armazenamento.

O cabeçote de soldagem mecanizada consiste em um “carro” acionado por um motor elétrico, com velocidade ajustável, deslocando-se através de um trilho colocado sobre a peça ou até mesmo em uma coluna. No cabeçote são montados o alimentador de arame, alimentador e recuperador de fluxo e a caneta de soldagem, bem como outros dispositivos.

2.1.1 Consumíveis de soldagem SAW

O desenvolvimento obtido pela engenharia possibilitou a obtenção de aços especiais e mais resistentes. Consequentemente, torna-se necessário até os dias atuais, o desenvolvimento de novos consumíveis de soldagem que permitam a obtenção de metais de solda com propriedades equivalentes à estes metais base (MAROUÇO, 2014).

Os consumíveis usados na soldagem por arco submerso são os eletrodos e os fluxos. A combinação entre estes determinada, juntamente com o metal de base e o procedimento de soldagem definido, as propriedades mecânicas do cordão de solda. Os eletrodos podem ser arames sólidos, tubulares ou fitas, fornecidos em carretéis ou bobinas, em diferentes dimensões e quantidades. Os

arames sólidos normalmente são cobreados por diferentes vantagens, como a melhoria da condutividade elétrica e facilidade no alinhamento e alimentação. Além disso, proporciona boa estabilidade do arco elétrico, especialmente em altos níveis de energia, resultando em menos respingos, maior controle do processo e melhor acabamento do cordão de solda.

Os arames são especificados com base em sua composição química, sendo divididos em três tipos: baixo (L), médio (M) e alto (H) teor de manganês. Dentro de cada grupo, os arames se diferenciam também pelos teores altos (K) ou baixos de elementos como o carbono (C), silício (Si) e manganês (Mn). De uma forma geral, os arames com maiores teores destes elementos favorecem a deposição de cordões com maior dureza e resistência a tração. O silício aumenta a fluidez da poça de fusão, melhorando o formato de cordões depositados com alta velocidade de soldagem, além de aumentar a resistência à porosidade (MARQUES et al., 2011). A Tabela I apresenta os requisitos de composição química de eletrodos para soldagem SAW, segundo a especificação AWS A 5.17.

Tabela 1 - Composição química de eletrodos para soldagem SAW

Classe AWS	Composição química (% peso)						
	Carbono (C)	Manganês (M)	Silício (Si)	Enxofre (S)	Fósforo (P)	Cobre (Cu)	Titânio (Ti)
Eletrodos com baixo manganês							
EL 8	0,10	0,25 - 0,60	0,07	0,030	0,030	0,35	
EL 8K	0,10	0,25 - 0,60	0,10 - 0,25	0,030	0,030	0,35	
EL 12	0,04 - 0,14	0,25 - 0,60	0,07	0,030	0,030	0,35	
Eletrodos com médio manganês							
EM 11K	0,07 - 0,15	1,00 - 1,50	0,65 - 0,85	0,030	0,025	0,35	0,03 - 0,17
EM 11	0,06 - 0,15	0,80 - 1,25	0,1	0,030	0,030	0,35	
EM 12K	0,05 - 0,15	0,80 - 1,25	0,10 - 0,35	0,030	0,030	0,35	
EM 13K	0,06 - 0,16	0,90 - 1,40	0,35 - 0,75	0,030	0,030	0,35	
EM 14K	0,06 - 0,19	0,90 - 1,40	0,35 - 0,75	0,030	0,025	0,35	
EM 15K	0,10 - 0,20	0,80 - 1,25	0,10 - 0,35	0,030	0,030	0,35	
Eletrodos com alto manganês							
EH 10K	0,07 - 0,15	1,30 - 1,70	0,05 - 0,25	0,025	0,025	0,35	
EH 11K	0,07 - 0,15	0,40 - 1,85	0,80 - 1,15	0,030	0,030	0,35	
EH 12K	0,06 - 0,15	1,50 - 2,00	0,25 - 0,65	0,025	0,025	0,35	
EH 14	0,10 - 0,20	1,70 - 2,20	0,10	0,030	0,030	0,35	

Fonte: Adaptado de (MARQUES et al., 2011)

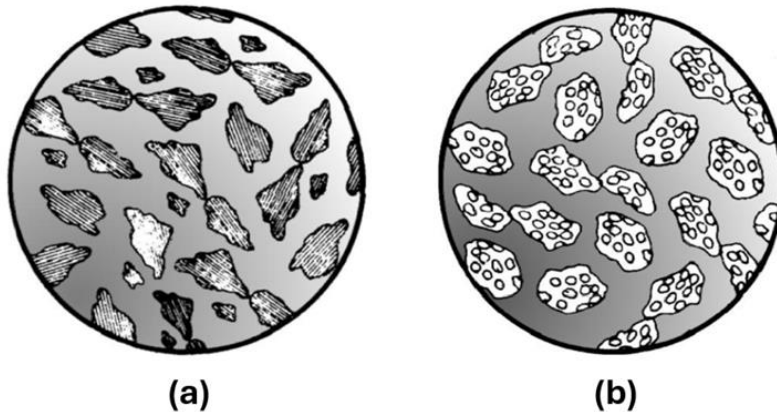
Os fluxos para soldagem SAW são compostos por uma mistura de óxidos e minerais granulares e fusíveis que cobrem o arco e fornecem proteção,

estabilidade para o arco elétrico, auxiliam na desoxidação do metal fundido, oferecem ação escorificante, protegem o arco e o metal aquecido da contaminação atmosférica (JUNIOR, 2018; GUPTA et al., 2024). Os fluxos formam a escória com determinadas propriedades físicas e químicas que podem agir na geometria do cordão de solda e possíveis descontinuidades como a mordedura (MARQUES et al., 2011). Eles influenciam fortemente a usabilidade, podem inclusive agregar elementos de liga, atuando nas propriedades mecânicas do metal de solda.

Em relação ao processo de fabricação, os fluxos de soldagem podem ser divididos em dois grupos: os fundidos e aglomerados. Os fluxos fundidos são fabricados pela fusão da mistura de seus componentes em fornos elétricos ou por queimadores. Depois de sua fusão e feita alguma adição final, a carga do forno é então derramada e resfriada, solidificando-se. As etapas posteriores da produção são a secagem, quando necessária, seguida por britagem, moagem e peneiramento, para garantir uma granulometria ideal e, por fim a embalagem (JUNIOR, 2018). São normalmente hidrofóbicos, o que facilita seu manuseio e principalmente o seu armazenamento, minimizando problemas de soldagem. São facilmente recicláveis pelos sistemas de recuperação de fluxo, sem grandes mudanças no tamanho das partículas. Uma de suas desvantagens diz respeito à dificuldade em adicionar desoxidantes e/ou ferro-ligas, limitando sua faixa de composições (MARQUES et al., 2011).

Os fluxos aglomerados, por sua vez, têm os seus ingredientes pulverizados, misturados a seco e aglomerados com silicato de potássio, sódio ou mistura entre estes (JUNIOR, 2018). Em seguida, esta mistura úmida é pelletizada e aquecida à uma temperatura inferior à utilizada nos fluxos fundidos, cerca de 600 à 950°C. O material obtido é então moído, peneirado e embalado. A diferença deste fluxo para o fundido diz respeito à facilidade de adição de desoxidantes e elementos de liga. É o tipo de fluxo mais utilizado no Brasil (MARQUES et al., 2011). A sua desvantagem está em relação à sua característica higroscópica, geração de fumaça ao ser fundido e a possibilidade de mudanças em sua composição devido à segregação ou remoção de partículas.

Figura 2 - Aspectos dos grãos dos fluxos fundidos (a) e aglomerados (b)



Fonte: (SILVA et al., 2012)

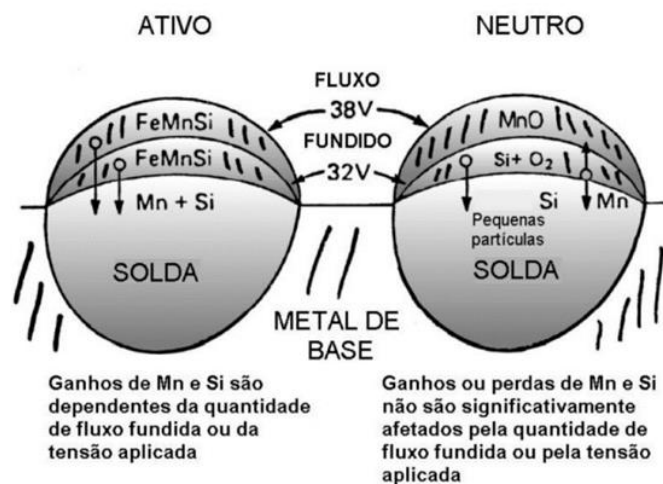
Segundo (MARQUES et al., 2011), o tamanho e a distribuição das partículas dos fluxos são importantes por influenciar a alimentação e a recuperação. Além disso, influem no nível de corrente utilizado e a forma do cordão de solda obtido.

Quanto às características químicas, o código ASME II Part C classifica os fluxos quanto a sua neutralidade, isto é, a sua influência sobre a composição química do metal depositado, podendo ter um caráter ativo, neutro ou ligado (MARQUES et al., 2011). A norma define o parâmetro de neutralidade (N) dado por:

$$N = 100 \times [(\Delta Si (\%) + \Delta Mn (\%))] \quad \text{Equação 1}$$

ΔSi e ΔMn são, respectivamente, a diferença entre os teores de Si e Mn, entre dois metais de solda sem diluição obtidos com os mesmos parâmetros de soldagem, exceto a tensão, que deve diferir em 8 V (JUNIOR, 2018). A diferença entre os fluxos neutros e ativos geralmente refere-se ao teor de manganês e/ou silício que será transferido do fluxo para o metal de solda (Figura 3).

Figura 3 - Comportamento do fluxo ativo e neutro



Fonte: (SILVA et al., 2012)

Os **fluxos neutros** são definidos pela ASME/AWS como aqueles que não produzem alterações significativas na composição química do metal depositado como resultado de mudanças na tensão do arco e, portanto, no comprimento do arco elétrico (JUNIOR, 2018; FORTES E ARAUJO, 2012; MARQUES et al., 2011). Consequentemente, a resistência mecânica do depósito de solda não é significativamente alterada pela quantidade fundida de fluxo, que varia com a tensão de soldagem. São aplicados geralmente para soldagem de aços carbono e baixa liga. Fornecem boa estabilidade de arco e produzem soldas com o mínimo de elementos de liga ou desoxidantes (GUPTA et al., 2024). São fluxos, no entanto, com maior sensibilidade à porosidade e trincas (SILVA et al., 2012).

Os **fluxos ativos** são descritos como aqueles que adicionam pequenas quantidades de manganês, silício ou ambos, na composição do metal depositado. Elementos estes desoxidantes e importantes para melhorar a resistência à formação de porosidade e trincas causadas pela presença de contaminantes no metal base ou provenientes do próprio fluxo (JUNIOR, 2018). Os **fluxos ligados** são definidos como aqueles que contém, além de manganês e silício, elementos de ligas tais como cromo, níquel, molibdênio, cobre, entre outros. As principais aplicações deste tipo de fluxo são na soldagem de aços baixa liga e revestimento duro [FORTES E ARAUJO, 2012; MARQUES et al., 2011).

A operação de soldagem com estes tipos de fluxos deve ser cuidadosamente controlada, já que os parâmetros, especialmente a tensão, influenciam na transferência de elementos de liga para a solda, conforme apresentado na Tabela 2. Maiores tensões de soldagem causam um aumento significativo do consumo de fluxo, aumentando os teores de manganês e/ou silício no depósito de solda. Consequentemente, aumenta também sua resistência mecânica e dureza, e diminui sua tenacidade. A aplicação deste tipo de fluxo fica normalmente restrita à peças com espessuras menores que 25 mm, sendo aplicável a soldas monopasse ou com poucos passes (SILVA et al., 2012). As propriedades físico-químicas do fluxo, especialmente a viscosidade a alta temperatura, possui um papel importante na transferência de elementos de liga durante a soldagem (WANG et al., 2023).

Tabela 2 - Influência da corrente e tensão de soldagem na transferência de Cr e Mo de um fluxo ativo na soldagem com eletrodo de aço não ligado

Corrente (A)	Tensão (V)	Composição da solda (% peso)	
		Cromo (Cr)	Molibdênio (Mo)
500	26	2,3	0,41
500	29	2,9	0,49
500	32	3,5	0,59
400	27	2,5	0,43
600	27	2,0	0,33

Fonte: Adaptado de (MARQUES et al., 2011)

Uma outra forma de classificação quanto às características químicas dos fluxos de soldagem relaciona-se com o índice de basicidade. Desta maneira, os fluxos são classificados como básicos, ácidos ou neutros (JUNIOR, 2018; FORTES E ARAUJO, 2012; MARQUES et al., 2011; GUPTA et al., 2024). Este índice, cujo objetivo é de quantificar estes efeitos, já definido por diversos autores, como Boniszewski (Equação 2) e a equação definida pelo Instituto Internacional de Soldagem (IIW), Equação 3.

$$B = \frac{CaO + MgO + Na_2O + K_2O + Ca_2F + \frac{1}{2}(FeO + MnO)}{Si_2O + \frac{1}{2}(Al_2O_3 + TiO_2 + ZrO_2)}$$

Equação 2

$$IB = \frac{CaO + CaF_2 + MgO + BaO + SiO + Li_2O + K_2O + Na_2O + \frac{1}{2}(MnO + FeO)}{Si_2O + \frac{1}{2}(Al_2O_3 + TiO_2 + ZrO_2)}$$

Equação 3

Caso o índice de basicidade for maior que 1, o fluxo é quimicamente básico. De modo geral, fluxos mais básicos tendem a reduzir os teores de oxigênio, enxofre e fósforo do metal depositado, melhorando as propriedades mecânicas do metal depositado, em particular sua resistência à fratura frágil (GUPTA et al., 2024). Quando o índice for próximo de 1, o fluxo tende a ser neutro. Quando o valor do índice de basicidade for menor que 1, o fluxo é quimicamente ácido, produzindo metais depositados com teores de oxigênio, fósforo e enxofre mais altos (MARQUES et al., 2011).

A Tabela 3 a seguir apresenta o comportamento de diferentes classes de fluxos quanto aos efeitos na penetração, características da escória e controle de hidrogênio (GUPTA et al., 2024).

Tabela 3 - Comportamento de diferentes fluxos de soldagem

Fluxos de soldagem	Efeitos na penetração	Características da escória	Controle de hidrogênio
Básicos	Tendem a promover penetração profunda devido a sua habilidade de criar uma poça de fusão mais fluida.	Produzem uma escória mais dura e viscosa, exigindo um maior esforço para removê-la após a soldagem. Oferece melhor proteção contra a contaminação atmosférica.	Conhecidos por seu baixo teor de hidrogênio, minimizando o riscos de trincas a frio. Ideais para aplicações de soldagem de materiais de alta resistência.
Neutros	Oferecem penetrações moderadas, tornando-os versáteis para vários tipos de configurações de juntas e espessuras de chapas	Tendem a produzir uma escória de mais fácil remoção em comparação aos fluxos básicos.	Geralmente apresentam um teor moderado de hidrogênio, tornando-os adequados para uma ampla gama de materiais.
Ácidos/Ativos	Geralmente produzem uma penetração mais rasa em comparação com os fluxos básicos e neutros.	Os fluxos ácidos geram uma escória mais fluida de boa remoção. Exigem, no entanto, maior atenção para evitar inclusões de escória	Podem apresentar um teor mais alto de hidrogênio em comparação com os demais fluxos. São necessários, portanto, maiores precauções para evitar trincas a frio.

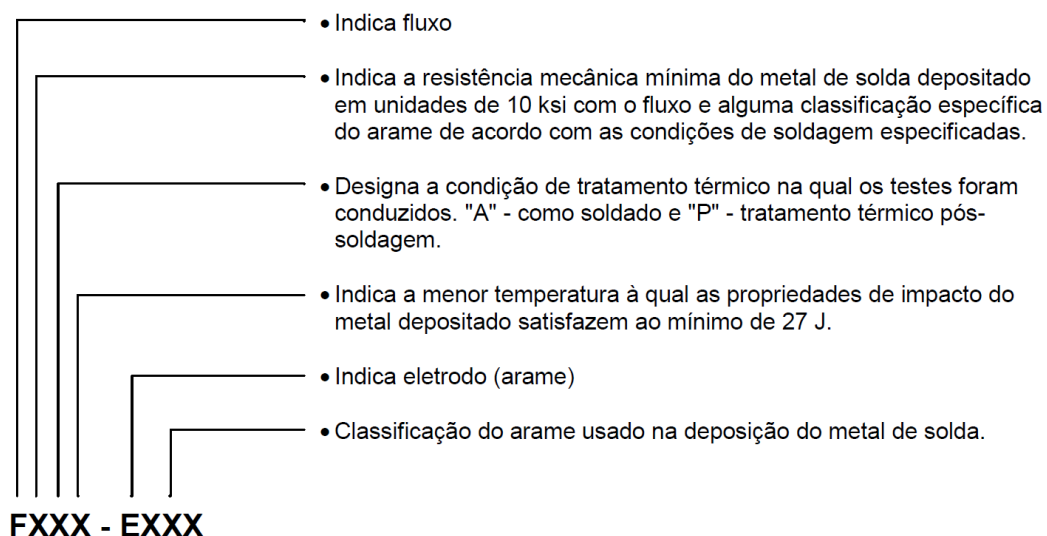
Fonte: Adaptada de (GUPTA et al., 2024)

A escolha de combinações arame-fluxo para a soldagem SAW é definida por sua influência nas propriedades mecânicas e na composição química requerida para o metal depositado (SILVA et al., 2012). A American Welding

Society (AWS) apresenta especificações destinadas aos consumíveis para a soldagem ao arco submerso. A A5.17 descreve a classificação de arames de aço carbono e a A5.23 especifica os eletrodos de aço de baixa liga, este envolvendo maiores valores de resistência mecânica para o metal depositado, além de maiores níveis de alongamento e requisitos mecânicos de impacto à temperaturas mais baixas (MARQUES et al., 2011).

Vale ressaltar que as propriedades mecânicas mencionadas dependem não só de uma dada combinação eletrodo-fluxo, mas também do procedimento de soldagem específico utilizado. A interação entre estas três variáveis durante a soldagem ditam as modificações metalúrgicas da junta (SHARMA; CHHIBBER, 2020). O sistema de classificação das combinações do arame-fluxo baseado na AWS pode ser visualizado na Figura 4.

Figura 4 - Sistema de classificação de consumíveis para a soldagem SAW conforme AWS



Fonte: FORTES E ARAUJO, 2004

A evolução da tecnologia de soldagem a arco depende do avanço e desenvolvimento de novos materiais, entre eles o projeto do fluxo de soldagem. A vida útil de uma junta soldada em ambientes rigorosos pode ser influenciada pela composição do fluxo (SHARMA; CHHIBBER, 2020). A formulação do fluxo afeta significativamente a qualidade do metal de solda e a produtividade

alcançada pelo processo. A formulação do fluxo afeta as características operacionais, incluindo a taxa de deposição, a estabilidade do arco, a penetração e a qualidade visual do cordão (GUPTA et al., 2024).

2.1.2 Fatores Determinantes para seleção do processo SAW

Conforme citado anteriormente, um dos fatores determinantes para a escolha do arco submerso é a sua elevada produtividade propiciada pela sua alta taxa de deposição e ciclo de trabalho. A soldagem por arco submerso leva a uma ampla variedade de combinações de arames e fluxos, mas também de diferentes arranjos de um e de vários arames e ao uso uma ou mais fontes de soldagem.

Os conceitos de taxa de deposição e aporte térmico são importantes para o processo de soldagem, pois influenciam diretamente a qualidade, eficiência e propriedades do material soldado. A taxa de deposição na soldagem é a quantidade de material de solda (consumível) depositado em um determinado período, geralmente expressa em quilos por hora (Kg/h). O cálculo da taxa de deposição depende do processo utilizado e da eficiência de transferência do material de adição para o cordão de solda. A fórmula geral leva em conta a velocidade de alimentação do arame, sua densidade, área da seção transversal e a **eficiência do processo**. Uma das grandes vantagens do processo de soldagem por arco submerso está em sua excelente eficiência, conforme apresentado na Tabela IV. Esta vantagem pode refletir também no custo de metal de adição que, por consequência, influencia no custo total da soldagem.

$$Taxa\ de\ deposição = \frac{\pi \times D^2}{4} \times V_a \times \rho \times \eta \quad \text{Equação 4}$$

Onde:

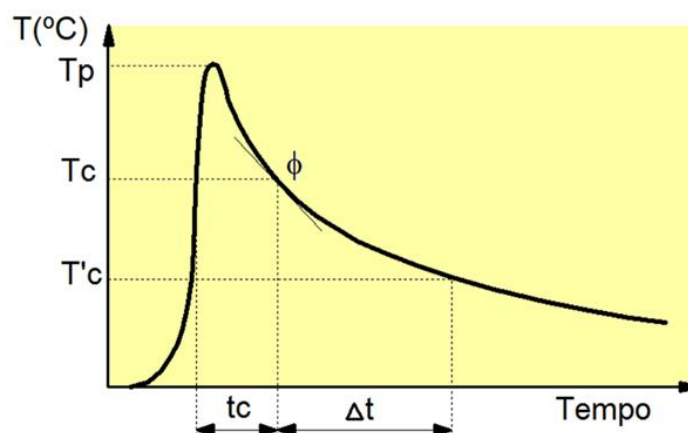
- D = Diâmetro do arame (mm)
- V_a = Velocidade de alimentação do arame (mm/s ou cm/min)
- P = Densidade do material do arame (g/mm³ ou kg/mm³)
- η = Eficiência do processo de transferência metálica (fator adimensional)

Tabela 4 - Eficiências típicas dos processos ao arco

Processo de soldagem	Eficiência Típica
SMAW	50 - 60%
GMAW	95%
FCAW	85%
SAW	99%

Fonte: Adaptada de (GUPTA et al., 2024)

A energia de soldagem, conhecida também como aporte térmico (heat input), refere-se à quantidade total de calor oriundo do arco elétrico, que é aplicada durante o processo de soldagem. Assim, certas regiões experimentam temperaturas de pico elevadas e são submetidas a gradientes de temperatura que acarretam alterações microestruturais, deterioração das propriedades mecânicas, físicas e químicas e a formação de tensões residuais na região soldada e em seu entorno (MENDES, 2018; MODENESI et al., 2012). A Figura 5 apresenta o ciclo térmico da soldagem, ou seja, a variação de temperatura em um ponto de uma peça.

Figura 5 - Representação esquemática do ciclo térmico na soldagem em um só passe

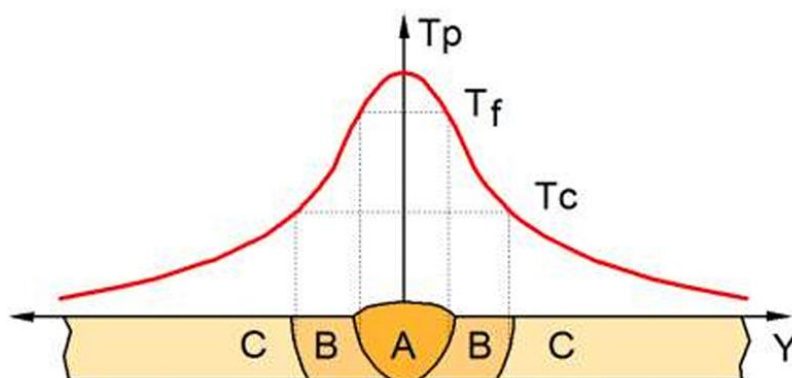
Fonte: MODENESI et al., 2012

T_p refere-se a Temperatura de Pico, ou seja, a máxima temperatura atingida em um dado ponto. A temperatura de pico indica a possibilidade de ocorrência de transformações microestruturais. O Tempo de Permanência (t_c) e a Temperatura Crítica (T_c) são parâmetros importantes para avaliar materiais em que a dissolução de precipitados e/ou crescimento de grãos pode ocorrer. Φ representa a velocidade de resfriamento, importante na determinação de microestruturas de materiais que podem sofrer transformações de fase durante o resfriamento MODENESI et al., 2012.

Como consequência do ciclo térmico durante a soldagem, podem ocorrer mudanças no comportamento dos materiais soldados em relação ao material original, ao longo de sua seção transversal, especialmente nas zonas fundidas (ZF) e zonas termicamente afetadas (ZTA), em comparação com o metal base (MB). A figura 6 apresenta as três regiões básicas formadas a partir do ciclo térmico.

A região da zona fundida é caracterizada por temperaturas de pico superiores à sua temperatura de fusão. O material base encontrado na ZTA não foi fundido, entretanto teve alterações em sua microestrutura e /ou propriedades. As temperaturas de pico são superiores a uma temperatura crítica (T_c). Já a região do metal base não foram alteradas pelo ciclo térmico, tendo suas temperaturas de pico inferiores a T_c .

Figura 6 - Macroestrutura esquemática da seção transversal de uma junta soldada e sua relação com as temperaturas de pico. A – ZF; B – ZTA e C – MB



Fonte: MODENESI et al., 2012

A Energia de Soldagem (H) na soldagem em arco, em que os valores de corrente (I) e tensão (U) de soldagem são relativamente constantes, H pode ser calculada conforme a Equação 5 (JUNIOR, 2018; MENDES, 2018; MODENESI et al., 2012).

$$H = \frac{U \times I}{v} \quad \text{Equação 5}$$

$$H_L = \eta \times H \quad \text{Equação 6}$$

Somente uma parte desta energia é transferida para a peça sendo soldada. Considerando este aspecto, pode-se definir a Energia Líquida Imposta de Soldagem (H_L) ou Aporte Térmico, conforme Equação 6. O rendimento térmico do processo (η) é sempre inferior a 1, sendo o restante representando as perdas do processo. A Tabela 5 mostra as faixas usuais de η para diferentes processos de soldagem [4, MODENESI et al., 2012]. Da mesma forma que para a eficiência de transferência metálica, o processo SAW apresenta excelente rendimento térmico, grande parte influenciado pela atuação do fluxo de soldagem e formação de escória, variação característica desse processo de soldagem em relação aos demais.

Tabela 5 - Rendimento térmico para alguns processos de soldagem

Processo	Rendimento Térmico (η)
Arco Submerso (SAW)	0,85 - 0,98
MIG/MAG (GMAW)	0,75 - 0,95
Eletrodo Revestido (SMAW)	0,70 - 0,90
TIG CC- (GTAW)	0,50 - 0,80
TIG CC+ (GTAW)	0,20 - 0,50
Laser (LBW)	0,005 - 0,70

Fonte: Adaptada de MODENESI et al., 2012

2.1.3 Variações do processo SAW:

Diversas variações deste processo foram desenvolvidas para aumentar ainda mais a sua produtividade e facilitar certas aplicações específicas. A soldagem em chanfro estreito (**narrow-gap**) é uma variação do processo SAW que utiliza cabeçotes especiais, permitindo a soldagem de peças de grande espessura com pequena abertura de raiz e ângulo de chanfro de 5 a 10°. Uma outra variante do processo SAW, é a soldagem com o eletrodo em formato de fita (**strip electrode**), da ordem de 0,5 mm de espessura e largura de 15 a 90 mm, resultando em cordões largos e com baixa diluição, adequados para aplicações de revestimento. Em seguida, temos a soldagem SAW com **adição de pó metálico** ao fluxo, aumentando a taxa de deposição, usado particularmente ao enchimento de chanfros (MARQUES et al., 2011).

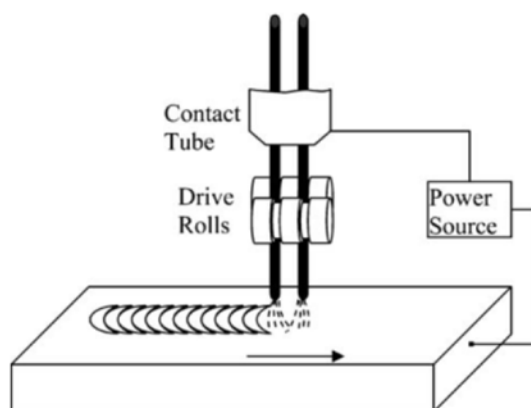
As variações mais comuns do processo SAW são as técnicas de soldagem com **múltiplos arames**, ou seja, a utilização de 2 ou mais arames sendo energizados por uma ou duas fontes de soldagem, com o objetivo de otimizar a taxa de deposição (kh/h) (MARQUES et al., 2011). A técnica **Single wire** é a mais comum dentro todas as configurações. Utiliza apenas um arame e uma fonte de soldagem. É normalmente aplicada com CC+ ou CC-, quando se deseja maiores níveis de penetração no metal base (JUNIOR, 2018).

A técnica **Twin-arc** refere-se a utilização de dois arames energizados por uma única fonte de soldagem, normalmente em CC+. A variação **Tandem-arc** utiliza dois ou mais arames energizados por fontes de soldagem diferentes, formando arcos elétricos distintos. A técnica **cold wire** é descrita pela adição de arame não energizado na poça de fusão gerada pelo arco elétrico de um outro arame energizado. O objetivo é de aumentar a taxa de deposição sem o aumento da energia de soldagem (JUNIOR, 2018). A combinação de variantes também é uma possibilidade, como a utilização da variação Tandem + Twin. O uso de múltiplos arames dependerá da capacidade e configuração da junta, principalmente no que diz respeito à limitação do aporte térmico utilizado.

2.1.4 SAW Twin-arc

A soldagem SAW com arames geminados, ou Twin-arc, é caracterizada por uma caneta de soldagem com duas cavidades através das quais são alimentados dois arames (JUNIOR, 2018), energizados por uma única fonte, conforme citado anteriormente. O processo é empregado no modo automático e pode ser aplicado em soldagem de juntas com chanfro na posição plana ou em juntas em ângulo na posição horizontal. Em comparação ao processo SAW convencional, a soldagem SAW Twin-arc se difere ligeiramente: o alimentador está equipado com um conjunto duplo de roldanas e guias, para que os dois arames sejam alimentados simultaneamente, com a mesma taxa de alimentação. A corrente elétrica é então distribuída igualmente entre os dois arames (JUNIOR, 2018; FORTES E ARAUJO, 2012]. A figura 7 representa um esquema de montagem do processo em questão.

Figura 7 - Esquema do processo SAW Twin com arames geminados

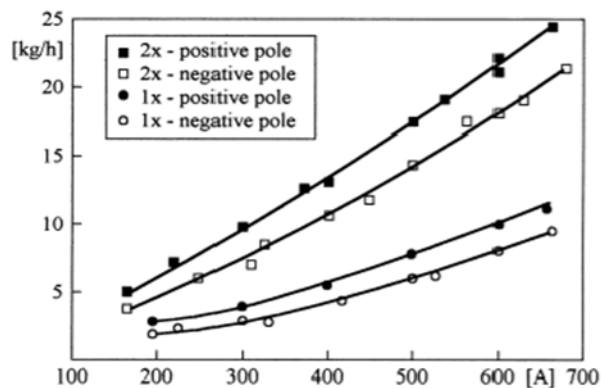


Fonte: (JUNIOR, 2018)

A grande vantagem apontada pela bibliografia gira em torno da taxa de deposição oferecida pelo processo SAW Twin, significativamente maior em relação ao convencional, em uma mesma faixa de energia ou aporte térmico. Segundo (JUNIOR, 2018), a taxa de deposição pode aumentar cerca de 30 a 50%, utilizando-se menores diâmetros de arame e a mesma corrente de soldagem. O gráfico na Figura 8 apresenta um comparativo em taxa de

deposição, em função da corrente de soldagem, para os processos SAW convencional e SAW Twin.

Figura 8 - Taxa de deposição (kg/h) em função da corrente de soldagem CC+/CC- para soldagem SAW convencional x SAW Twin Arc



Fonte: (JUNIOR, 2018)

A tabela 6 também traz um comparativo de taxas de deposição que podem ser alcançados para diversos diâmetros de arame sólido e tubulares para diferentes polaridades. A 1000 A, um arame de 4,0 mm depositará 14,2 kg/h com CC+. Se for aplicada a mesma corrente para a configuração 2 x 2,0 mm, será alcançada a taxa de deposição de 17,5 kg/h. O aumento na taxa de deposição pode ser atribuído primeiramente ao aumento na densidade de corrente e no aquecimento por resistência dos arames de menor diâmetro e, consequentemente, a uma maior taxa de fusão. Para atingir maiores taxas de deposição no processo SAW TWIN, o diâmetro dos arames ($\varnothing$ 1,2 – 2,5 mm) deve ser 70% menor que o diâmetro do arame empregado no processo equivalente com um único arame.

Tabela 6 - Taxas de deposição típicas para a soldagem com um arame e com arco geminado para uma extensão de eletrodo (stick-out) de 30 mm

		600 A	800 A	1000 A
SAW Single	CC - ; 4,0 mm ; arame sólido	9,8	14,6	20,5
	CA - ; 4,0 mm ; arame sólido	8,5	12,6	17,4
	CC+ ; 4,00 mm ; arame sólido	7,2	10,5	14,2
	CC+ ; 4,00 mm ; arame tubular MC	8,5	12,8	15,8
	CC+ ; 4,00 mm ; arame tubular FCW	9,2	14,6	18,0
SAW Single	CC + ; 2 x 2,0 mm ; arame sólido	8,0	11,8	17,5
	CC + ; 2 x 2,4 mm ; arame sólido	7,4	10,9	15,3
	CC + ; 2 x 2,4 mm ; arame tubular MC	8,7	14,4	21,0
	CC + ; 2 x 2,4 mm ; arame tubular FCW	9,4	15,3	22,9

Fonte: Adaptada de (SILVA et al., 2012)

Uma outra vantagem do processo de soldagem com arco geminado diz respeito à sua aplicação em altas velocidades de soldagem, principalmente na soldagem de juntas em ângulo, possível graças à uma poça de fusão mais comprida (SILVA et al., 2012). Adicionalmente, a capacidade de corrente do processo com arco geminado é maior que a do processo com um arame.

2.2 Variáveis do processo SAW:

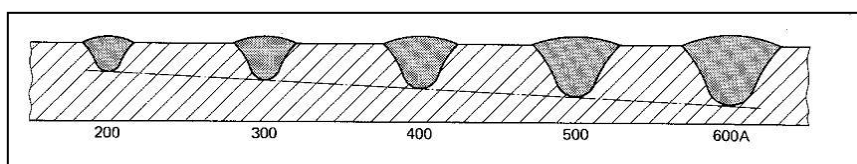
A soldagem SAW envolve o controle de alguns parâmetros que afetam o comportamento do processo que, por sua vez, afetam a profundidade de penetração, a morfologia do cordão de solda e a composição química do metal depositado (GUPTA et al., 2024). Dentre as variáveis controladas no processo de soldagem por arco submerso, temos a corrente de soldagem, tensão do arco, velocidade de soldagem, largura e altura da camada de fluxo e os ajustes mecânicos.

A corrente de soldagem (I) é considerada a variável mais influente para o processo (FORTES, 2009), determinando fatores como a taxa de fusão do arame, profundidade de fusão e a quantidade de metal base fundido. Se a corrente for excessivamente alta, a fusão será também excessivamente profunda, conforme apresentado na Figura 9, ou resultar em uma zona

termicamente afetada maior. Correntes muito altas significam também um desperdício de energia e de arame de solda no sentido de reforço excessivo, resultam também em cordões com elevada razão penetração/largura, favorecendo fissurações a quente, reforço excessivo e formação de mordeduras. Por outro lado, se a corrente for muito baixa, haverá penetração e reforço insuficiente [FORTES E ARAUJO, 2012; MARQUES et al., 2011).

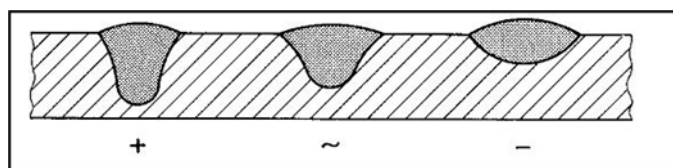
O tipo de corrente mais usado é a contínua com eletrodo positivo, que resulta em maior penetração. A corrente direta (eletrodo negativo) aumenta a taxa de fusão. Já a corrente alternada (AC) apresenta resultados intermediários e minimiza a ocorrência de sopro magnético, particularmente na soldagem com arames múltiplos.

Figura 9 - Efeito da intensidade da corrente sobre a penetração



Fonte: (FORTES, 2009)

Figura 10 - Efeito da polaridade da corrente sobre a penetração

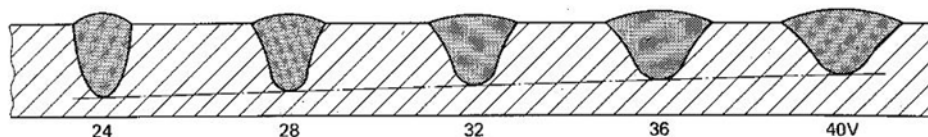


Fonte: (FORTES, 2009)

A tensão do arco (V), ou diferença de potencial elétrico entre a ponta do arame de solda e a superfície do metal de solda fundido, trata-se da variável mais próxima em importância à corrente de soldagem para o processo SAW. A tensão de soldagem varia com a distância entre o arame de solda e a poça de fusão (comprimento do arco). Se o comprimento do arco aumentar, a tensão do arco aumenta. De forma inversa, se o comprimento do arco diminuir, a tensão do arco diminui. A tensão do arco tem um pequeno efeito na quantidade de

arame de solda depositado, que é determinada majoritariamente pela corrente de soldagem. A tensão do arco determina principalmente a geometria da zona de fusão e o reforço (perfil de cordão de solda). Altas tensões do arco produzem cordões mais largos, mais planos e menos profundos (SILVA et al., 2012). Esta variável tem pouco efeito sobre a taxa de deposição. Por outro lado, pode ter forte influência na composição química e nas propriedades de soldas feitas com fluxo ativo. Tensão excessivamente alta pode aumentar a dificuldade de remoção da escória (MARQUES et al., 2011).

Figura 11 - Efeito da tensão de soldagem no perfil do cordão



Fonte: (FORTES, 2009)

A largura e a altura da camada de fluxo de soldagem influenciam na aparência e a integridade do cordão de acabamento bem como na soldagem propriamente dita. Se a camada de fluxo granulado for muito alta, deverá resultar em um cordão áspero e rugoso [FORTES E ARAUJO, 2012; MARQUES et al., 2011]. Os gases gerados durante a soldagem não conseguem escapar prontamente e a superfície do metal de solda fundido fica distorcida. Por outro lado, se a camada de fluxo for muito rasa, a zona de soldagem não estará inteiramente submersa. Neste cenário, podem ocorrer centelhamentos e respingos, resultando em cordões com aparências ruins, além da possibilidade de porosidades.

Figura 12 - Influência da camada de fluxo de soldagem na aparência do cordão de solda



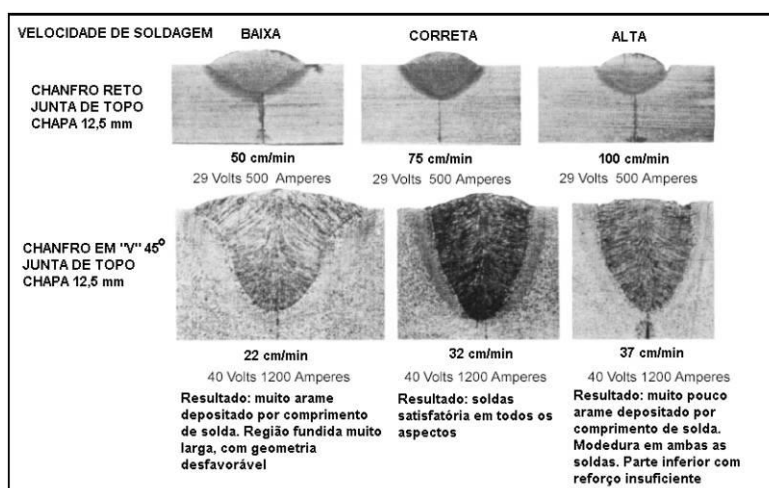
Fonte: (FORTES, 2009)

O volume de fluxo também interfere na largura do cordão, uma vez que uma camada muito espessa resulta em cordões mais estreitos que o normal. Isso ocorre devido ao roubo de calor pelo excesso de fluxo, diminuindo assim a eficiência da soldagem (CASTRO, 2017). Para cada condição de ajuste de parâmetros de soldagem existe uma altura ótima de fluxo granulado. Essa altura pode ser estabelecida aumentando lentamente a quantidade de fluxo de soldagem até que o arco esteja submerso e que não ocorra mais o centelhamento. Os gases serão liberados sem turbulência em torno do arame de solda. Segundo a bibliografia, o procedimento adequado é o de aplicar uma camada de fluxo com largura três vezes superior à largura da poça de fusão.

A velocidade de soldagem, atrelada a qualquer combinação de corrente e tensão de soldagem, podem influenciar no aporte térmico por unidade de comprimento de solda, na taxa de deposição e consequentemente, no reforço de solda. Normalmente, apenas a corrente de soldagem pode afetar a penetração da solda. Entretanto, se a velocidade de soldagem diminuir além de um certo valor, a penetração também diminuirá. Isso acontece porque uma boa parte da poça de fusão estará embaixo do arame de solda e a força penetração do arco será atenuada pela poça. Inversamente, se a velocidade de soldagem ultrapassar um certo valor, a penetração aumentará porque o arame de solda estará à frente da poça de fusão (CASTRO, 2017).

A dimensão transversal do cordão de solda é inversamente proporcional à velocidade de soldagem, isto é, a largura, penetração e reforço tendem a diminuir com o aumento da velocidade, conforme figura 13. Velocidade excessivas podem aumentar a tendência de mordeduras e ao apagamento do arco, resultando em poros e trincas. Em baixas velocidades, a ocorrência de porosidade diminui. Em velocidades muito baixas, no entanto, há uma tendência de aparecimento de trincas a depender da geometria do cordão (FORTES, 2009).

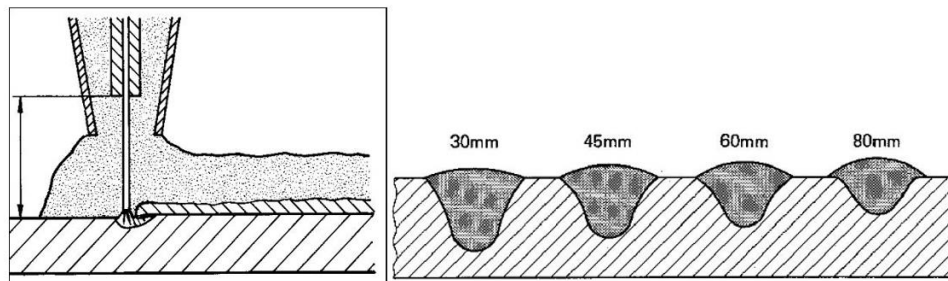
Figura 13 - Influência da velocidade de soldagem na penetração, geometria e descontinuidades



Fonte: (FORTES, 2009)

Com relação aos ajustes mecânicos, vale ressaltar a posição do arame de solda em relação à chapa. A extensão do eletrodo deve ser verificada para controlar a geometria do cordão e a profundidade de penetração. Normalmente, ajusta-se a extensão do eletrodo para 8 vezes no diâmetro do arame (FORTES, 2009). A posição do arame em relação à junta pode estar diretamente ligada a descontinuidades como a mordedura e/ou problemas no reforço do cordão.

Figura 14 - Influência do parâmetro stick-out (extensão) na penetração



Fonte: (FORTES, 2009)

2.3 Projeto e preparação da junta

O projeto e preparação da junta são dois dos fatores mais importantes na execução de uma solda por arco submerso. A junta deve ser adequadamente projetada e preparada, e deve estar razoavelmente uniforme ao longo dos cordões de solda. Caso contrário, o operador de soldagem terá que fazer tentativas para compensar irregularidades. O tempo despendido na preparação adequada da junta é mais que compensado pelas maiores velocidades de soldagem e soldas de melhor qualidade (SILVA et al., 2012).

A montagem da junta escolhida para qualquer atividade de soldagem pode afetar diretamente a qualidade, resistência e a aparência do cordão de solda. A seleção do tipo de junta adequado depende de fatores como a espessura e material da junta, acessibilidade, equipamento disponível para o bisel, tamanho das peças, dentre outros. Em **juntas de ângulo (filete)**, dois fatores devem ser avaliados: o posicionamento do arame de solda e a forma do reforço de solda (Figura 15). De forma geral, a soldagem de juntas em ângulo requer velocidades e tensões de soldagem ligeiramente menores em comparação às juntas de topo com a mesma corrente de soldagem.

Figura 15 - Efeito do posicionamento do arame na forma do reforço de solda em juntas de ângulo



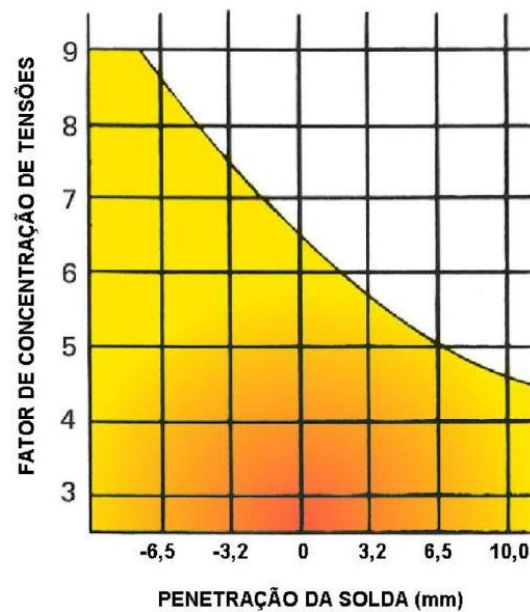
Fonte: (SILVA et al., 2012)

A profunda penetração do processo de soldagem por arco submerso resulta em economia substancial no consumo de arame de soldagem comparado a outros processos. O tamanho do filete feito pelo processo SAW pode ser consideravelmente reduzido e, ainda assim, atingir a mesma resistência da junta obtida pelos processos SMAW e GMAW com pernas maiores. O cálculo de projeto da resistência de juntas em ângulo é baseado na dimensão da garganta do depósito de solda. A dimensão da garganta é obtida através da equação 7.

$$Garganta = \frac{Perna \times \sqrt{2}}{2} = Perna \times 0,707 \quad \text{Equação 7}$$

A resistência de uma solda em ângulo é fortemente influenciada pela penetração da solda (SILVA et al., 2012), conforme apresentado na Figura 16. A curva de concentração de tensões no filete diminui rapidamente à medida que a penetração aumenta. A concentração de tensões a uma penetração de -6,5 mm é 75% mais alta que a uma penetração de +6.5 mm.

Figura 16 - Variação do fator de concentração de tensões com a penetração da solda



Fonte: (SILVA et al., 2012)

Com respeito à determinação da posição adequada do arame de solda, deve-se considerar fatores como o alinhamento do arame em relação à junta; o ângulo de inclinação nas direções laterais (inclinação transversal da junta) e o ângulo de ataque do arame de solda. Segundo SILVA et al. (2012), a linha de centro do arame não deve estar exatamente na linha de centro da junta, mas abaixo, direcionada à peça horizontal de uma distância igual a $\frac{1}{4}$ à $\frac{1}{2}$ do diâmetro do arame. Um alinhamento descuidado ou impreciso poderá causar uma soldagem insatisfatória.

Figura 17 - Influência do alinhamento do arame em relação a junta em ângulo horizontal



Fonte: Adaptada de (SILVA et al., 2012)

Na execução de soldas horizontais em ângulo, o arame é inclinado entre 20 e 45° da vertical. Esta variação dependerá de fatores como o acesso para o bocal, especialmente durante a soldagem de peças estruturais; e da espessura relativa das peças que formam a junta. Na soldagem de cordões largos, os efeitos do ângulo de ataque são relativamente pequenos. No entanto, torna-se importante na execução cordões pequenos e em soldagem a altas velocidades, pois influenciam na estabilidade da tensão do arco.

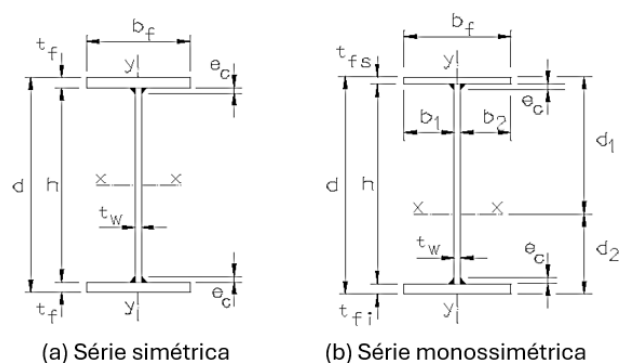
2.4 Soldagem de estruturas metálicas

O processo de soldagem de estruturas metálicas possui grande relevância dentro da indústria metalúrgica, pelos custos envolvidos comparados a outros métodos de união. Diversos são os segmentos de mercado onde se faz necessário o uso de estruturas metálicas soldadas. É amplamente utilizado na fabricação de estruturas como pontes, galpões, edifícios, torres de transmissão, navios, plataformas de petróleo, dentre outras. Uma similaridade entre estes e outros tipos de estruturas está na utilização de um componente denominada viga metálica que, por sua vez, é confeccionado pela união de dois ou mais perfis.

Estas estruturas de aço são altamente personalizadas, com especificações muito diferentes, incluindo comprimento, largura da seção transversal, largura e espessura da alma e largura e espessura do flange, levando à redução do peso da estrutura, comparativamente aos perfis laminados. Os perfis de utilização corrente são aqueles cuja seção transversal se assemelha às formas das letras I, H, U e Z, recebendo denominação análoga a essas letras (SILVA et al., 2012).

A Associação Brasileira de Normas Técnicas (ABNT), através da norma NBR 5884, estabelece requisitos gerais para a caracterização e fabricação de uma série de perfis I e H estruturais de aço soldado por arco elétrico. Segundo a norma, um perfil I corresponde a um elemento estrutural constituído por três chapas de aço estrutural, unidas entre si por soldagem a arco elétrico, formando aproximadamente, em sua seção transversal, um I.

A norma estabelece uma classificação entre série simétrica, composta por perfis que apresentam simetria na sua seção transversal X-X e Y-Y, e série monossimétrica, cuja simetria se dá apenas na seção transversal Y-Y, conforme Figura 18. A Tabela 7 apresenta diferentes geometrias de perfis simétricos e monossimétricos, baseado em sua relação de largura da mesa (bf) e altura dos perfis (d).

Figura 18 - Classificação dos perfis soldados conforme ABNT 5884

Fonte: (SILVA et al., 2012)

Tabela 7 - Tipos de perfis baseados em sua relação d/b_f

Perfil Soldado	Série	Descrição	Relação
Simétrico	CS	Perfis soldados tipo Pilar	$d/b_f = 1$
	CVS	Perfis soldados tipo Viga-Pilar	$1 < d/b_f \leq 1,5$
	VS	Perfis soldados tipo Viga	$1,5 < d/b_f \leq 4$
	PS	Perfis soldados duplamente simétricos	**
Monossimétrico	VSM	Perfis soldados monossimétrico tipo Viga	$1 < d/b_f \leq 4$
	PSM	Perfis soldados monossimétricos	**

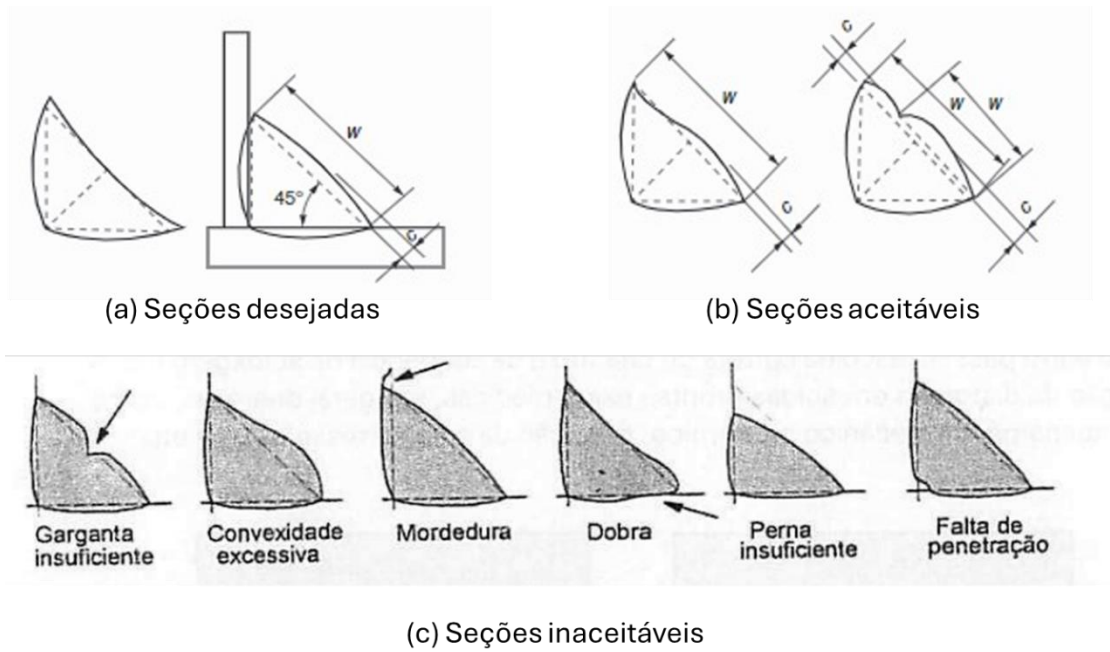
(**) Perfis que não estejam relacionados nas tabelas do Anexo B da NBR 5884

Fonte: Adaptada de (ABNT NBR 5884, 2013)

A norma define requisitos para a definição e preparação do material, como a seleção das chapas, etapas de corte, limpeza e procedimento de soldagem, utilizando preferencialmente o processo de soldagem por arco submerso, mediante o uso de equipamentos automáticos ou semiautomáticos. O cordão de solda deve ser contínuo com sua penetração podendo ser total, parcial, de filete duplo e de um só lado da alma. No último caso, cuidados devem ser tomados para evitar problemas de corrosão.

Especificações com relação aos critérios de aceitação são apresentados na norma NBR 5884, categorizando descontinuidades (trincas, mordedura, porosidade) e os critérios de inspeção necessários para aplicações que submetam os perfis soldados a cargas estáticas ou cíclicas. As seções desejáveis, aceitáveis e inaceitáveis das soldas de filetes são estabelecidas, conforme Figura 19.

Figura 19 - Seções desejadas, aceitáveis e inaceitáveis de soldas de filete



Fonte: (ABNT NBR 5884, 2013)

2.4.1 Dimensionamento da solda em ângulo

A correta especificação das dimensões de uma solda de filete, como a garganta e a perna, é fundamental para garantir a integridade estrutural da união e, conseqüentemente, a segurança e durabilidade do componente. A inspeção das dimensões de soldas de ângulo se baseia no fato de que uma solda inadequada pode comprometer a resistência da junta, levando ao surgimento de falhas prematuras. Além disso, a superdimensionamento implica em aumento de custo e desperdício de material. Portanto, compreender os parâmetros críticos envolvidos na especificação e controle dessas dimensões é essencial tanto do ponto de vista técnico quanto econômico. A norma NBR 5884 e a AWS D1.1 “Structural Welding Code-Steel” estabelecem as dimensões aceitáveis para a solda em ângulo, conforme as Tabelas 8 e 9, respectivamente.

Tabela 8 - Dimensões da solda em ângulo conforme ABNT NBR 5884

Espessura do material a soldar - t (mm)	Dimensão mínima do cordão de solda, perna - e_{c1} (mm)	Garganta efetiva da solda de filete - a_1 (mm)
$t \leq 6,35$	3	3
$6,35 < t \leq 12,5$	3,5	3,5
$12,5 < t \leq 19$	4	4
$19 < t \leq 38$	5,5	5,5
$38 < t \leq 56$	7	7

Fonte: Adaptada de (ABNT NBR 5884, 2013)

Tabela 9 - Tamanho mínimo da solda de filete conforme AWS D1.1

Minimum Fillet Weld Size			
Base Metal Thickness (T)		Minimum Size of Fillet Weld (F)	
in	mm	in	mm
$T \leq 1/4$	$T \leq 6$	$F = 1/8$	$F = 3$
$1/4 < T \leq 1/2$	$6 < T \leq 12$	$F = 3/16$	$F = 5$
$1/2 < T \leq 3/4$	$12 < T \leq 20$	$F = 1/4$	$F = 6$
$3/4 < T$	$20 < T$	$F = 5/16$	$F = 8$

OBS.: Perna da solda = $(F \times \sqrt{2})/2$

Fonte: AWS D1.1/D1.1M:2020

3. METODOLOGIA DE PESQUISA

A pesquisa realizada neste trabalho é de natureza exploratória e experimental, buscando compreender melhor o comportamento de combinações de fluxos e arame, através da execução de ensaios práticos em diferentes velocidades de soldagem. Os fluxos de soldagem utilizados, bem como a sua classificação de acordo com a SFA/AWS A5.17 e propriedades mecânicas obtidas por testes conforme ASME II Part C, são descritos na Tabela X. Todos os fluxos passaram pela etapa de ressecagem, a fim de minimizar os efeitos da possível umidade presente nos consumíveis ao processo de soldagem, principalmente os fluxos importados por modal marítimo. Utilizou-se um forno para ressecagem, mantendo a temperatura em uma faixa de 250-300°C durante um intervalo de duas horas.

Os testes e experimentos foram conduzidos no centro de processos da ESAB Brasil, em Contagem MG, com o apoio de soldadores, departamento de controle de qualidade, e da equipe de gestão e desenvolvimento de produtos. A variante do processo de soldagem por arco submerso SAW Twin Arc foi empregada para os testes de soldagem em alta velocidade dos perfis soldados.

Tendo em vista os desafios para a soldagem de estruturas metálicas pelo processo SAW, o estudo tem como objetivo realizar os testes de soldagem comparando de forma qualitativa os resultados obtidos a partir de critérios como a linearidade do cordão, a destacabilidade da escória, presença de escória secundária e descontinuidades superficiais como mordedura, porosidade e martelamento do cordão.

As dimensões da solda angular também serão examinadas, sobretudo o comprimento das pernas do filete soldado, tendo como referências os padrões e normas de soldagem estruturais ABNT 5884 e AWS D1.1. A coleta de dados foi realizada utilizando-se de instrumentos de medição, como o calibre de solda para aprovação visual e posteriormente execução de ensaio de macrografia, com o objetivo de avaliar a seção de solda de filete obtida de acordo com critérios estabelecidos em norma.

Algumas características de fabricação, como a granulometria e resistência do grão, além da composição química dos fluxos serão exploradas, com o intuito

de estabelecer relações com os resultados obtidos em diferentes níveis de velocidade de soldagem. Além disso, o preço por quilo dos fluxos nacionais e importados serão avaliados, visando apresentar o custo-benefício de cada solução para o mercado interno brasileiro.

Tabela 10 - Caracterização e propriedades mecânicas dos fluxos de soldagem utilizados

Caracterização							
Código Fluxo	Origem	Lote	Classificação	Tipo de Escória	Modo de Fabricação	Característica Química	Basicidade (Boniszewski)
Fluxo A	Nacional	VTY29F7659	SFA/AWS A5.17 F7A2-EM12K	AB (Aluminate-Basic)	Aglomerado	Neutro	1.1: Semi básico (Neutro)
Fluxo B	Nacional	VTY31F7664	SFA/AWS A5.17 F7A0-EM12K	AR (Aluminate-Rutile)	Aglomerado	Ativo, ligado ao Mn e Si	0.6: Ácido
Fluxo C	Importado	RMX0750881	SFA/AWS A5.17 F7A0-EM12K	AB (Aluminate-Basic)	Aglomerado	Neutro	0.8: Semi básico (Neutro)
Fluxo D	Importado	RMX1151471	SFA/AWS A5.17 F7A2-EM12K	AB (Aluminate-Basic)	Aglomerado	Neutro	1.0: Semi básico (Neutro)

Propriedades Mecânicas						
Código Fluxo	Limite de Escoamento (MPa)	Resistência a Tração (MPa)	Alongamento (%)	Estricção (%)	Resistência ao impacto (J)	Temperatura de teste (°C)
Fluxo A	460	572	32	68	53	-30
Fluxo B	626	745	27	45	48	-20
Fluxo C	457	568	31	68	21	-20
Fluxo D	446	525	33	72	34	-30

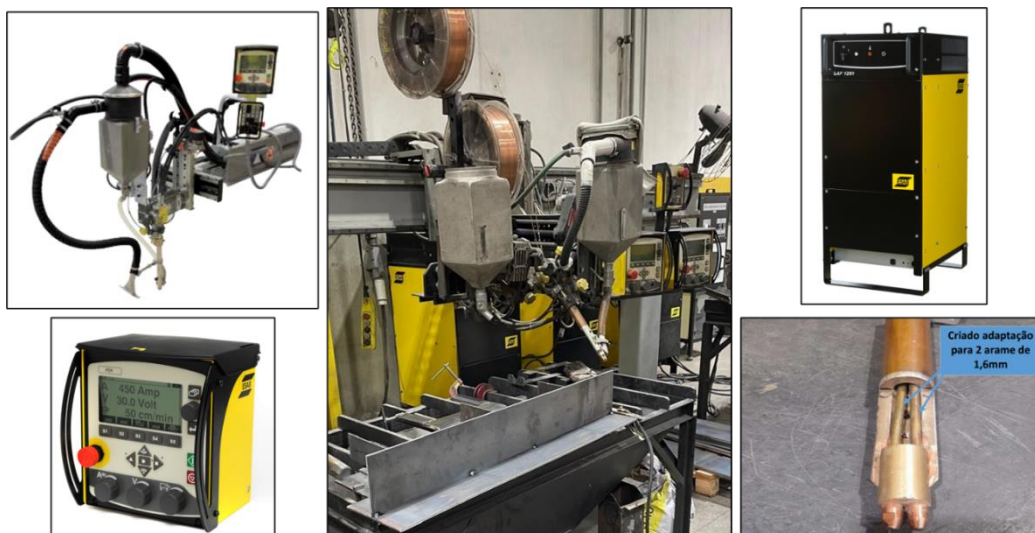
Fonte: Autor

3.1 Materiais e métodos

Os testes práticos foram realizados em uma coluna com cabeçote ESAB A6S ARC Master com sistema Twin WIRE, equipado com motor de alimentação A6 VEC e controlador de processo A2-A6 PEK para pré-configuração rápida e precisa de todos os parâmetros antes do início da soldagem. A fonte de soldagem SAW utilizada foi o modelo ESAB LAF 1251, fonte retificadora DC para soldagem automatizada. Utilizou-se também o sistema de recuperação de fluxo, acoplado ao cabeçote. A Figura 20 apresenta a solução de soldagem automatizada utilizada.

Para a execução da soldagem com a variante TWIN ARC, a equipe envolvida desenvolveu uma modificação na caneta + mandíbula de soldagem, agregando guias metálicos e bicos de contato 1.6mm individuais (Figura 20). A alteração garantiu maior estabilidade e maior qualidade na execução dos testes de soldagem em alta velocidade.

Figura 20 - Conjunto SAW ESAB: A6S + PEK + LAF 1251 + Caneta modificada



Fonte: Autor

O material base selecionado para os testes foi o ASTM A-36, aço carbono estrutural macio e laminado a quente, largamente usado por apresentar excelente soldabilidade. A Tabela XI apresenta suas propriedades mecânicas e

composição química típicas. Dentre as suas aplicações, destacam-se o uso nos segmentos de construção civil como pontes, edifícios, plataformas de petróleo, fabricação de equipamentos e estruturas. O material foi adquirido em formato de chapa laminada a quente e cortada por oxicorte, nas seguintes dimensões (espessura x largura x comprimento): $\frac{1}{4}$ " x 8" x 40" e $\frac{1}{4}$ " x 6" x 40".

Tabela 11 - Propriedades mecânicas e composição química do Aço ASTM A-36

Propriedades Mecânicas Típicas			Composição Química Típica				
Resistência ao Escoamento (min)	Resistência à Tração (min)	Alongamento (%)	C	Mn	Si	P	S
250 Mpa (36 ksi)	400-550 Mpa (58-80 ksi)	23	0.25	0.80 - 1.20	0.40	0.04	0.05

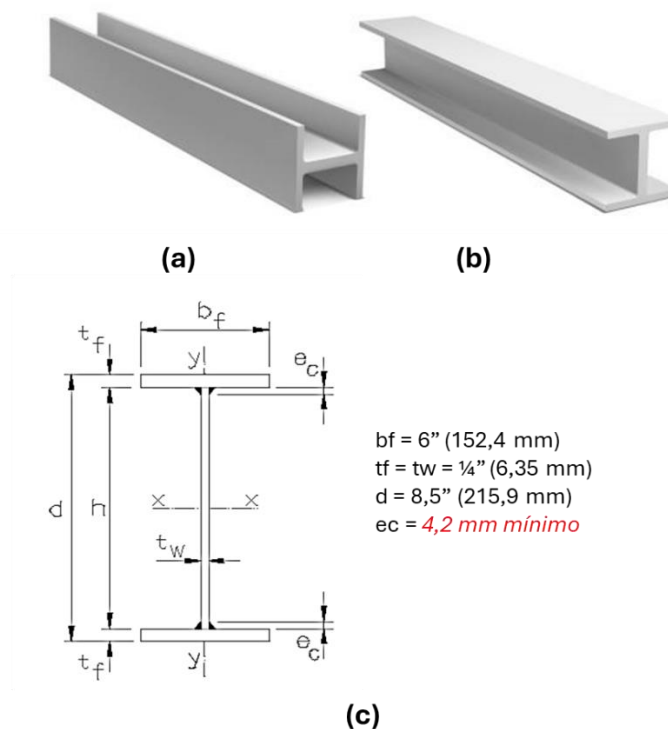
Fonte: (BRINGAS, 2004)

O material de adição definido foi o arame duplo OK Autrod 12.22, 1.6 mm de diâmetro, classificação EM12K conforme AWS SFA 5.17. Trata-se de um arame sólido cobreado, com médio teor de manganês, utilizado para soldagem de aços de baixo e médio teor de carbono pelo processo arco submerso.

3.1.1 Preparação e soldagem das vigas

As chapas recebidas apresentaram distorção considerável, devido ao processo de corte utilizado na confecção das mesmas, sendo assim necessário a etapa de desempeno das mesmas anterior à montagem. Um dispositivo de fixação foi elaborado para posicionar as chapas para a produção das vigas, utilizando as chapas de 8" de largura como flange e 6" como alma, conforme Figura 21. O modelo de viga utilizado corresponde a um perfil simétrico série CVS, conforme Tabela 7, apresentando relação d/bf de aprox. 1,4. A união chapas das vigas se deu através de ponteamientos em suas extremidades e no meio das chapas, de modo a garantir o mínimo de abertura possível na junta em ângulo gerada entre o flange e a alma.

Figura 21 - Posição de soldagem (a), modelo de viga (b) com 40" (Aprox. 1 m) de comprimento e dimensões do perfil I (c) utilizados



Fonte: Autor

Durante a preparação para a soldagem, verificou-se fatores importantes como a fixação da viga na mesa e o seu alinhamento adequado em relação ao cabeçote de soldagem, garantindo um posicionamento uniforme da peça. O comprimento do arame (stick-out) e ângulo da caneta em relação à junta foram avaliados e mantidos constantes durante os testes realizados, considerando suas influências no processo de soldagem.

À respeito do sistema de alimentação, verificou-se o correto posicionamento dos arames em relação às roldanas de fixação e mandíbula, bem como a sua estabilidade durante o processo. Os valores de corrente, tensão, velocidade de alimentação, velocidade de soldagem e sentido de deslocamento do cabeçote foram ajustados através do controlador PEK. Através do mesmo foi possível acompanhar a variação destes parâmetros durante o processo tal como o aporte térmico calculado. As variáveis apresentadas neste trabalho foram uma média calculada pelo controlador, obtida durante a operação de soldagem.

3.1.2 Avaliação visual das soldas em ângulo

Utilizou-se como método a realização de dois cordões de solda para cada junta, totalizando quatro cordões em cada face ou lado da viga metálica. Para cada cordão efetuado, avaliou-se o comportamento da solda resultante, se valendo de fatores visuais, como alinhamento e presença de descontinuidade, além da facilidade de remoção da escória, critério extremamente importante para a soldagem por arco submerso de grandes estruturas. A aferição das pernas de solda, por meio do uso de calibre de solda, também foi um fator avaliado, utilizando-se de 4,2 mm o valor mínimo desejado. Este valor foi utilizado seguindo a especificação de garganta pela AWS D1.1, conforme Tabela 9. O cálculo utilizado para se obter a perna de solda mínima a partir da dimensão da garganta pode ser visualizado na mesma tabela.

Regulou-se os conjuntos de variáveis corrente, tensão e velocidade de alimentação até a obtenção do cordão de solda otimizado, repetindo os testes para cada um dos fluxos de soldagem, testando-os em velocidades de deslocamento pré-estabelecida (140,160,180 e 200 mm/s). A evolução deste parâmetro foi utilizada para avaliar o comportamento dos fluxos em cenários de alta produtividade.

3.1.3 Corte e preparação das amostras para macrografia

Após a fase soldagem das vigas com os quatro fluxos de soldagem em diferentes velocidades de deslocamento, os cordões mais regulares foram selecionados. As vigas foram então desassociadas manualmente por corte plasma, utilizando o equipamento ESAB Cutmaster 50+ e uma serra de fita posteriormente para obter uma seção de 200 mm para cada cordão de solda. A linearidade do cordão foi novamente avaliada, bem como a presença de descontinuidades.

As faces cortadas foram limpas, retificadas e polidas para a realização da macrografia no laboratório de controle e qualidade. Utilizou-se a o reagente metalográfico Nital (ácido nítrico 10% em álcool), indicado para materiais de

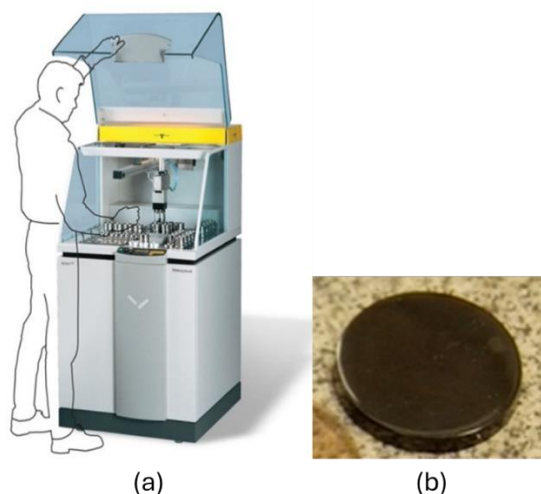
médio à baixo teor de carbono, para revelar o cordão depositado, sua geometria e possíveis descontinuidades. A seção de solda em ângulo obtida foi comparada às seções apresentadas na Figura 19. Utilizou-se o software *ImageJ* para dimensionamento das pernas de solda (alma e flange) para a solda angular.

4. RESULTADOS OBTIDOS

O recebimento dos fluxos de soldagem foi uma etapa importante para a execução dos testes de soldagem, principalmente os fluxos importados, até então novidades para o time ESAB Brasil. Além dos testes de soldabilidade e propriedades mecânicas executados pela equipe do centro de processos, apresentados na Tabela X, foram realizados testes para caracterização dos fluxos de soldagem em relação à sua composição química típica (avaliação dos óxidos presentes), granulometria, resistência e densidade do grão. Entende-se que a influência destas características dos fluxos é importante para o comportamento durante a soldagem, sendo comumente avaliadas em bibliografias anteriores. A tabela XII e XIII apresentam os resultados obtidos para composição química e granulometria + densidade do grão, respectivamente.

Para a análise dos óxidos dos fluxos aglomerados, foi utilizado a técnica de fluorescência de raios-x. Trata-se de uma técnica analítica instrumental não destrutiva e multielementar. A amostra é fundida com os fundentes: tetraborato de lítio, carbonato de sódio e nitrato de estrôncio. O material é fundido a uma temperatura de 1050 °C em uma máquina de fusão em cadinhos de platina com ouro. A pastilha fundida é lida no equipamento Axios. A partir deste método, é possível determinar a concentração de elementos na amostra com base na intensidade dos raios X característicos de cada elemento presente. Esta técnica tem a capacidade de detectar simultaneamente diversos elementos em uma ampla gama de números atômicos e concentrações, permitindo a obtenção de resultados quantitativos e semiquantitativos.

Figura 22 - Espectrômetro de Raios-x – modelo: Axios-DY1223 – marca: Panalytical (a) e amostra compactada para avaliação (b)



Fonte: Autor

O procedimento de avaliação da granulometria do fluxo utilizado envolve o peneiramento do material, trata-se de um processo de separação sólida em frações de tamanhos diferentes, utilizando superfícies perfuradas ou peneiras. O teste utilizou cerca de 300 g de cada fluxo e permitiu comparar a características dos fluxos, entre grãos mais finos e mais grosseiros. Os parâmetros de resistência e densidade do grão estão relacionados a um aspecto econômico, a capacidade de reaproveitamento dos consumíveis com a utilização de recuperadores de fluxo.

Tabela 12 - Composição Química dos Fluxos de Soldagem

Composição Química dos Fluxos de Soldagem - Presença de Óxidos										
Fluxo	Lote	H ₂ O 1000°C (%)	SiO ₂ (%)	MnO (%)	Al ₂ O ₃ (%)	FeO (%)	TiO ₂ (%)	CaO (%)	MgO (%)	CaF ₂ (%)
Fluxo A	VTY29F7659	0,028	23	11,16	26,84	3,53	0,2	1,36	23,08	8,1
Fluxo B	VTY31F7664	0,022	17,14	13,8	40,46	4,92	6,95	0,76	5,45	7,83
Fluxo C	RMX0750881	0,031	21,96	8,7	35,6	5,39	2,04	0,83	16,27	8,47
Fluxo D	RMX1151471	0,030	19,73	12,15	24,74	5,31	4,23	0,9	24,11	7,61

Fonte: Autor

Tabela 13 - Granulometria dos fluxos de soldagem

Granulometria dos fluxos de soldagem										
Fluxo	Lote	Resistência do grão (%)	Densidade do grão (g/cm ³)	% Retido nas peneiras						
				#10	#14	#16	#20	#32	#48	#65
Fluxo A	VTY29F7659	27,92	1,19	-	2,15	-	42,19	75,99	-	98,22
Fluxo B	VTY31F7664	46,4	1,19	-	39,42	-	64,92	90,84	-	98,79
Fluxo C	RMX0750881	30,26	1,13	-	37,91	-	67,83	92,63	-	99,25
Fluxo D	RMX1151471	33,84	1,17	-	1,41	-	24,33	79,88	-	98,22

Fonte: Autor

Após a execução das etapas de preparação, que inclui o desempenho das chapas, montagem das vigas, fixação e posicionamento correto da mesma em relação ao cabeçote de soldagem, verificação da alimentação dos arames e seu posicionamento na região a ser soldada, ajustes no ângulo da caneta em relação a junta e avaliação da queda do fluxo, os testes de soldagem foram então realizados, totalizando cerca de 55 cordões de solda.

As tabelas a seguir apresentam as melhores condições obtidas pela combinação dos 4 fluxos de soldagem com o duplo arame utilizado, para cada velocidade de soldagem. A seleção do melhor cordão para cada velocidade envolveu uma análise qualitativa do cordão sobre os aspectos de linearidade, destacabilidade da escória, presença de escória secundária, martelamento, porosidade e mordeduras, conforme apontado na última seção do trabalho. Adotou-se uma faixa de notas entre 1 a 5, sendo 1 – inadequado; 2 – ruim; 3 – regular; 4 – boa; 5 – adequado.

A qualidade da solda pode ser definida em termos de propriedades mecânicas obtidas, geometria do cordão e distorções resultantes no componente soldado. Apesar do tema de deformação da peça em virtude das variáveis de soldagem selecionadas não figurar em um dos principais objetivos do trabalho, observou-se que os conjuntos de variáveis utilizados para soldagem dos cordões selecionados não resultaram em distorções consideráveis das vigas metálicas, problema apontado por (HAYAJNEH et al., 2017).

As dimensões médias das pernas foram aferidas com calibre de solda, sendo o principal aspecto avaliado para aprovar/reprovar o cordão realizado. Utilizou-se 4,2 mm como o requisito dimensional mínimo para aprovação. Importante ressaltar que a medição das pernas da solda angular foi novamente avaliada na etapa de macrografia, dada a imprecisão de medição da perna de

solda nesta fase. As imagens dos cordões e suas respectivas macrografias podem ser visualizadas no Anexo A, organizadas a partir dos fluxos e pela sequência de velocidade de soldagem.

Tabela 14 - Conjunto de parâmetros e avaliação dos fluxos em 140 cm/min

Conjunto de Parâmetros e Avaliação								
Fluxo	Cordão N°	Pernas (mm)	Velocidade de Soldagem (cm/min)	Tensão (V)	Velocidade de alimentação (cm/min)	Corrente média (A)	Ângulo Caneta (°)	Stick-out (mm)
			140	29-30	410-425	530-570	40	15-20
			Linearidade	Remoção de Escória	Escória secundária	Martelamento	Mordeduras	Porosidade
Fluxo A	C23	Entre 5 e 6	5	5	5	5	5	3
Fluxo B	C45	Entre 5 e 6	5	3	4	5	5	5
Fluxo C	C36	Entre 4 e 5	4	5	5	5	4	5
Fluxo D	C4	Entre 5 e 6	4	5	5	5	4	5

Fonte: Autor

Tabela 15 - Conjunto de parâmetros e avaliação dos fluxos em 160 cm/min

Conjunto de Parâmetros e Avaliação								
Fluxo	Cordão N°	Pernas (mm)	Velocidade de Soldagem (cm/min)	Tensão (V)	Velocidade de alimentação (cm/min)	Corrente média (A)	Ângulo Caneta (°)	Stick-out (mm)
			160	29-30	440-460	560-620	40°	15-20
			Linearidade	Remoção de Escória	Escória secundária	Martelamento	Mordeduras	Porosidade
Fluxo A	C25	Entre 5 e 6	5	5	5	5	5	4
Fluxo B	C46	Entre 5 e 6	4	3	3	4	4	5
Fluxo C	C38	Entre 5 e 6	4	5	5	5	4	5
Fluxo D	C8	Entre 5 e 6	4	5	5	5	4	4

Fonte: Autor

Tabela 16 - Conjunto de parâmetros e avaliação dos fluxos em 180 cm/min

Conjunto de Parâmetros e Avaliação								
Fluxo	Cordão N°	Pernas (mm)	Velocidade de Soldagem (cm/min)	Tensão (V)	Velocidade de alimentação (cm/min)	Corrente média (A)	Ângulo Caneta (°)	Stick-out (mm)
			180	30-32	520-560	700-800	40°	15-20
			Linearidade	Remoção de Escória	Escória secundária	Martelamento	Mordeduras	Porosidade
Fluxo A	C29	Entre 4 e 5	4	4	5	5	4	5
Fluxo B	C48	Entre 5 e 6	4	2	4	5	4	5
Fluxo C	C40	Entre 4 e 5	5	5	5	5	5	5
Fluxo D	C14	Entre 4 e 5	4	4	5	5	4	5

Fonte: Autor

Tabela 17 - Conjunto de parâmetros e avaliação dos fluxos em 200 cm/min

Conjunto de Parâmetros e Avaliação								
Fluxo	Cordão N°	Pernas (mm)	Velocidade de Soldagem (cm/min)	Tensão (V)	Velocidade de alimentação (cm/min)	Corrente média (A)	Ângulo Caneta (°)	Stick-out (mm)
			200	29,5	590-600	760-800	40°	15-20
			Linearidade	Remoção de Escória	Escória secundária	Martelamento	Mordeduras	Porosidade
Fluxo A	C33	Entre 5 e 6	4	4	5	5	4	5
Fluxo B	C50	Entre 5 e 6	4	2	4	5	4	5
Fluxo C	C42	Entre 5 e 6	5	5	5	5	5	5
Fluxo D	C18	Entre 4 e 5	5	4	5	5	5	5

Fonte: Autor

As dimensões da solda angular avaliadas com o auxílio do software *ImageJ*, em especial as pernas de solda, tanto para a direção do flange quanto para a alma, são apresentadas na Tabela 18. A variação apresentada refere-se a diferença entre as dimensões da perna de solda do flange para a perna de solda da alma.

Tabela 18 - Dimensões da solda angular para os cordões selecionados

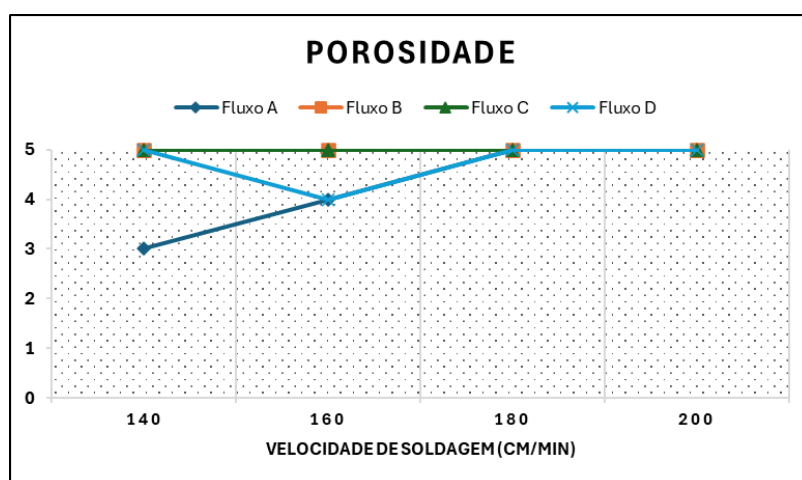
Dimensão das seções de solda angular			
Cordão N°	Perna Flange (mm)	Perna Alma (mm)	Variação
C4	5,95	4,11	31%
C8	4,38	4,72	-8%
C14	5,96	3,62	39%
C18	5,15	4,45	14%
C23	6,31	5,20	18%
C25	5,68	4,66	18%
C29	5,07	3,85	24%
C33	4,85	3,89	20%
C36	5,01	3,78	25%
C38	5,06	4,37	14%
C40	5,04	4,67	7%
C42	4,97	3,87	22%
C45	6,29	5,89	6%
C46	4,88	4,88	0%
C48	5,97	4,43	26%
C50	4,44	4,93	-11%

Fonte: Autor

A partir dos resultados obtidos, algumas discussões sobre o comportamento dos fluxos podem ser apresentadas. Iniciando pela presença de porosidades na superfície dos cordões selecionados, observou-se que todos os cordões, em exceção ao C23 (Fluxo A, 140 cm/min) não demonstraram grandes

problemas com esta descontinuidade. O desempenho dos fluxos neste critério relaciona-se às etapas de preparação, limpeza e montagem das vigas e, principalmente, pelo processo de ressecagem dos fluxos, de modo a garantir pouca ou nenhuma umidade presente no consumível. O caso de porosidade mais evidente, podendo ser considerado uma cavidade na superfície da solda, encontrado no cordão 23, deve-se a falha ou falta de cobertura de fluxo durante a soldagem. Conforme apontado em (FORTES E ARAUJO, 2012; FORTES, 2009; MARQUES et al., 2011), a falta de camada de fluxo traz problemas como centelhamento e respingos, resultando em mau acabamento, além da possibilidade de porosidades.

Figura 23 - Comportamento dos fluxos quanto à porosidade em diferentes velocidades de soldagem



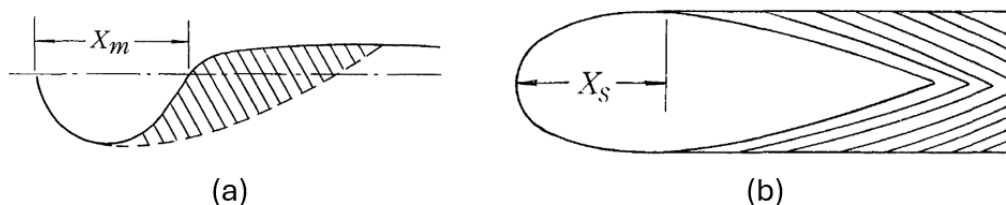
Fonte: Autor

Em relação à presença de mordeduras, verificou-se importante influência a linearidade do cordão. Notou-se durante a execução dos testes e seleção dos parâmetros para obtenção dos cordões otimizados, que a descontinuidade era fortemente ligada à tensão de soldagem. Em todas as velocidades de soldagem utilizadas neste trabalho, o parâmetro foi mantido em uma faixa de 29-32V. Conforme apresentado no referencial teórico, a bibliografia indica a influência da tensão de soldagem principalmente na geometria e reforço do cordão (SILVA et al., 2012). Valores abaixo desta faixa resultavam em cordões mais côncavos, favorecendo a presença de mordeduras. Conforme avaliado por (OHARA et al.,

1986), mesmo que a ocorrência de mordedura esteja relacionada com o aumento da velocidade soldagem, as variáveis de corrente e soldagem desempenham um papel fundamental no aparecimento desta descontinuidade. Verificou-se também que valores de tensão acima da faixa favoreciam não só o aparecimento de mordeduras, mas também a dificuldade de remoção da escória, conforme apontado em (MARQUES et al., 2011).

Os testes iniciais realizados pela equipe envolvida utilizaram não somente a configuração Twin Arc, mas também a variante convencional da soldagem por arco submerso, com um único arame de 4 mm. Notou-se, no entanto, grande ocorrência de mordeduras com a variante convencional, para os níveis de velocidade de soldagem utilizados neste trabalho. Esta situação foi bem explorada por (OHARA et al., 1986), no qual avaliou que a mordedura se trata do grande problema que restringe o limite superior da velocidade de soldagem na soldagem por arco submerso. Segundo os autores, duas variáveis principais afetam a ocorrência de mordedura, a primeira sendo o deslocamento do metal fundido (X_m) e o segundo, o ponto de solidificação ao longo da borda da poça de fusão (X_s). As variáveis são apresentadas na Figura 23. Em resumo, quando o metal fundido é deslocado mais do que o ponto de solidificação ($X_m > X_s$), ocorre a mordedura.

Figura 24 - Variáveis típicas para dimensionar uma poça de fusão: deslocamento do metal fundido, X_m (a) e ponto de solidificação ao longo da borda da poça de fusão, X_s



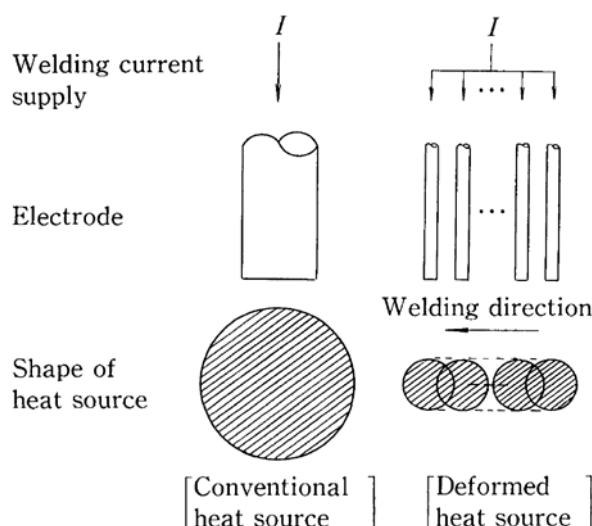
Fonte: Adaptada de (OHARA et al., 1986)

A pesquisa realizada indica que o formato da fonte de calor influencia significativamente o perfil de solidificação de uma poça de solda, Figura 24. O aumento do raio da fonte de calor na direção da soldagem, o que o autor

denominou de linearização da fonte de calor, atrasa a solidificação, aumentando o X_s . Por outro lado, o aumento do raio que cruza esta direção diminui significativamente o X_s . O trabalho conclui que a linearização de uma fonte de calor (LH-SAW) na direção da soldagem por meio de um arco duplo, Twin Arc por exemplo, retarda esta solidificação da poça de fusão. Como resultado destes efeitos, a condição crítica de ocorrência de mordedura, $X_m > X_s$, ocorrerá apenas em altas velocidades de soldagem.

Além do aumento de X_s , os autores indicam que a variante Twin Arc contribui também para diminuir X_m , devido a força de atração entre os arcos elétricos. O arco principal tende a se direcionar para a parte traseira da poça de fusão, enquanto o arco secundário tende a se direcionar para a parte frontal, condição denominada sopro magnético. Desta maneira, verifica-se de que a adoção da variante Twin Arc neste trabalho preveniu de forma significativa a ocorrência de mordeduras, em comparação com a execução dos testes na condição de soldagem SAW convencional.

Figura 25 - Método de deformação da fonte de calor com um grupo de eletrodos finos

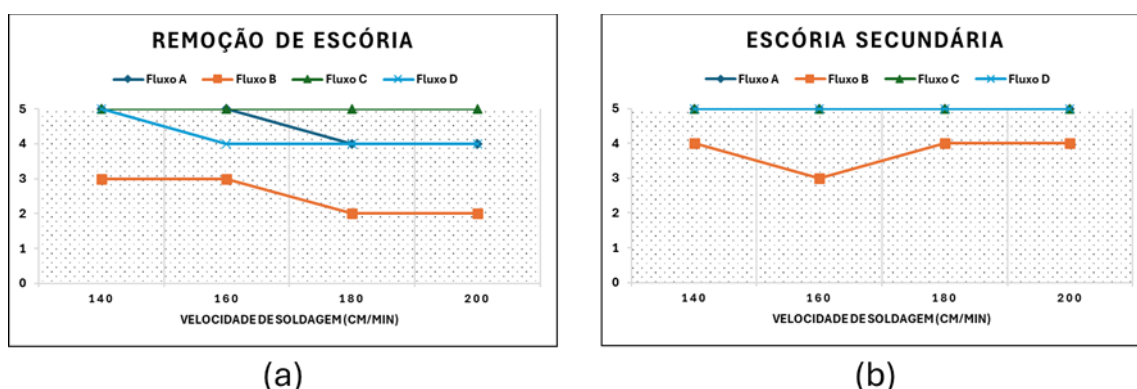


Fonte: (OHARA et al., 1986)

A destacabilidade da escória, ou seja, sua facilidade de remoção, talvez seja um dos principais critérios para avaliação do comportamento dos fluxos em

cenários de altas velocidades de soldagem. A dificuldade de remoção da escória pode levar a impactos negativos na produtividade industrial, como a fabricação de grandes estruturas metálicas. Os resultados da destacabilidade de escória dos fluxos e presença de escória secundária, obtidos no presente trabalho, são apresentados na Figura 26.

Figura 26 - Comportamento dos fluxos quanto à destacabilidade de escória (a) e presença de escória secundária (b) em diferentes velocidades de soldagem

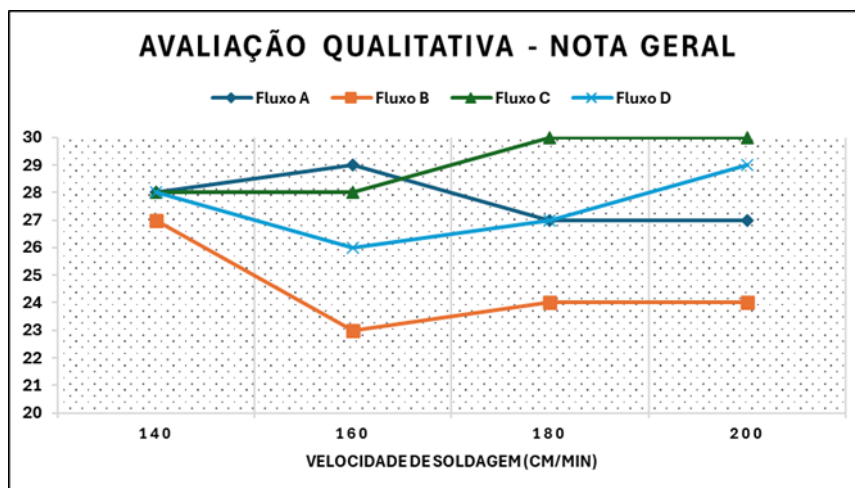


Fonte: Autor

Os resultados apresentam que os fluxos A, C e D, consumíveis com escória básica AB e característica química neutra, conforme Tabela X, demonstraram melhores resultados que o fluxo B, escória rutilica AR, com características ativas. É possível observar que, ao aumentar a velocidade de soldagem, O fluxo C manteve a sua característica de excelente remoção de escória. Enquanto isso, os fluxos A e D, apresentaram ligeira dificuldade com a evolução da velocidade. Ao traçar uma relação com o quesito granulometria dos fluxos, percebe-se que o fluxo C apresenta uma granulometria mais fina em relação aos fluxos A e D. Por mais que o fluxo B apresente características de granulometria similares ao fluxo C, sua composição química ativa reage mais fortemente com o metal base, resultando em uma escória de mais difícil remoção e inclusive com a presença de escória secundária, o que não foi apresentado neste trabalho, para os demais fluxos neutros.

As notas qualitativas concedidas aos fluxos de soldagem para cada critério de avaliação em diferentes níveis de velocidade foram somadas, e são apresentadas na Figura 27. A nota máxima, 30 pontos, foi obtida pelo fluxo C nas velocidades de 180 e 200 cm/min. Os pontos perdidos nas velocidades de 140 e 160 cm/min estão relacionados à linearidade e mordeduras mínimas detectadas ao longo do cordão, critérios estes que estão ligados também à fatores como a preparação e ajustes anterior à soldagem. Verificou-se que oito (8) cordões obtiveram notas acima de 90%, com base nos critérios determinados.

Figura 27 - Avaliação qualitativa dos fluxos quanto ao comportamento em diferentes níveis de velocidade



Fonte: Autor

Em relação aos resultados dimensionais e de macrografia obtidos, verificou-se que os cordões selecionados apresentaram em sua maioria, uma variação na dimensão entre a perna de solda do flange para a perna de solda da alma. Notou-se inclusive que dois cordões dos fluxos A e B apresentaram dimensões da perna de solda da alma inferior à dimensão mínima definida para este trabalho (4,2 mm). Este desvio era esperado, tendo em vista a dificuldade encontrada para manter um perfeito alinhamento da viga metálica em relação ao cabeçote de soldagem, sem a utilização de um seguidor de junta.

Vale ressaltar também a influência dos fluxos de soldagem na obtenção do perfil do cordão, visto que os fluxos com notas inferiores foram os mesmos a apresentar dimensões de pernas de solda inadequadas. A obtenção dos parâmetros adequados de velocidade de alimentação do arame e corrente para cada nível de velocidade de soldagem foi um desafio encontrado durante a execução dos testes, podendo ser uma possível causa para as dimensões das pernas abaixo do esperado.

A tabela XIX abaixo apresenta uma avaliação das macrografias obtidas pelos oito (8) cordões com melhores qualificações. As seções de solda em ângulo obtidas foram comparadas com as seções apresentadas pela Figura 19 deste trabalho, que representa as seções desejadas, aceitáveis e inaceitáveis de uma solda em filete. Verifica-se que os cordões obtidos pela soldagem com o Fluxo C apresentaram seções de solda desejadas, tanto em seu perfil como também no dimensional, conforme requisitos mínimos AWS D1.1 e ABNT NBR 5884.

Tabela 19 - Avaliação das seções de solda obtidas

Avaliação de seção - Solda Angular						
<i>Fluxo</i>	<i>Cordão N°</i>	<i>Nota Obtida</i>	<i>Perna Flange (mm)</i>	<i>Perna Alma (mm)</i>	<i>Variação</i>	<i>Avaliação (Referência Fig. 19)</i>
Fluxo D	C4	28	5,95	4,11	31%	Seção Aceitável, inclusão de escória
Fluxo D	C18	29	5,15	4,45	14%	Seção Aceitável, inclusão de escória
Fluxo A	C23	28	6,31	5,20	18%	Seção Desejada
Fluxo A	C25	29	5,68	4,66	18%	Seção Aceitável, mordedura
Fluxo C	C45	28	6,29	5,89	6%	Seção Desejada
Fluxo C	C46	28	4,88	4,88	0%	Seção Desejada
Fluxo C	C48	30	5,97	4,43	26%	Seção Desejada
Fluxo C	C50	30	4,44	4,93	-11%	Seção Desejada

Fonte: Autor

Um ponto sobre o desempenho do Fluxo C aberto à questionamentos se encontra em seus resultados de propriedades mecânicas, em especial ao valor de resistência ao impacto (tenacidade) obtido, de 21 J, conforme apresentado na Tabela X. Sua classificação conforme SFA/AWS 5.17, F7A0, exige um valor mínimo de 27 J de resistência ao impacto à -20°C. O ensaio de resistência ao impacto busca avaliar o comportamento de deformação do material a uma temperatura relativamente baixa, ou seja, sua tendência à fratura frágil.

O valor obtido pelo fluxo pode estar relacionado à diversos fatores. O primeiro deles relaciona-se à sua composição química. Conforme apontado por (OSORIO et al., 2016), estudos apontam que a influência da composição química, em particular os óxidos CaO, MgO, CaF₂ e Al₂O₃, nas propriedades mecânicas do metal soldado obtido, observando diferenças na tenacidade para diferentes combinações de composição química dos fluxos.

Os autores ainda citam a influência dos parâmetros e procedimentos de soldagem utilizados nas propriedades mecânicas, utilizados para a fabricação do corpo de prova, como a corrente e tensão de soldagem, velocidade de deslocamento, temperatura interpasse e presença de descontinuidades. A confecção dos corpos de prova para o ensaio Charpy, bem como a execução do ensaio propriamente dito, também são variáveis que podem influenciar o resultado de resistência ao impacto obtido.

4.1 Avaliação dos custos envolvidos: Fluxos nacionais x importados

A equipe de gestão e desenvolvimento de produtos – segmento *Filler Metals*, busca anualmente oportunidades de expansão de portfólio, baseado em demandas para a indústria nacional. Identificou-se a necessidade de apresentar ao mercado uma solução ESAB de fluxos de soldagem para aplicações de alta velocidade na posição 2F (solda em ângulo), de baixo custo, tendo em vista o potencial volume mensal de consumo deste consumível.

A Tabela XX a seguir apresenta um comparativo de custo por quilo em dólares, entre os fluxos nacionais, fabricados na planta ESAB Brasil, e os fluxos importados, fabricados em outras plantas da ESAB Corporation. O cálculo de custo para os consumíveis importados leva em consideração tanto a taxa *intercompany*, custos de frete, como também a variação do câmbio internacional. A taxa *intercompany* trata-se de uma taxa cobrada entre empresas que fazem parte do mesmo grupo econômico. Os últimos 12 meses apresentaram uma forte variação do câmbio comercial, com o dólar variando de R\$4,93 em Jan/24, para R\$6,08 em Jan/25. Este cenário inviabiliza a estratégia de operar com um fluxo importado com custo target de USD 1,04.

Tabela 20 - Comparativo de custos para os fluxos nacionais e importados

<i>Produto</i>	<i>Origem</i>	<i>Custo Corrente no Brasil (USD/KG)</i>
Fluxo A	Nacional	1,15
Fluxo B	Nacional	1,27
Fluco C	Importado	1,76 (*)
Fluxo D	Importado	2,04 (*)

(*) FX USD-BRL: 6,07; Frete marítimo de 1 container (25 Tons)

Fonte: Autor

5. CONCLUSÕES

O presente trabalho teve como principal objetivo a avaliação do comportamento de fluxos de soldagem por arco submerso em aplicações 2F de alta velocidade. Os 4 fluxos de soldagem foram avaliados sob diferentes critérios, envolvendo aspectos visuais, presença de descontinuidades, destacabilidade de escória, aspectos dimensionais das seções de solda em ângulo, como as pernas de solda, utilizando como referência normas estruturais reconhecidas, como AWS D1.1 e ABNT NBR 5884. Aspectos de viabilidade econômica foram discutidos, tendo em vista o objetivo de examinar os custos dos fluxos nacionais e importados.

De modo geral, a escolha pela variante do processo de soldagem SAW com arames duplos 2x1,6 mm, ou Twin Arc, se demonstrou um excelente caminho para a soldagem nos níveis de velocidade utilizados no trabalho, 140-200 cm/min, minimizando drasticamente os problemas com mordeduras, mais presente na soldagem SAW convencional com único arame de 4 mm.

Os testes realizados neste trabalho apresentaram a grande influência das etapas de preparação e montagem das vigas metálicas, assim como a ressecagem dos fluxos de soldagem a ajustes nas combinações de parâmetros. Critérios como a linearidade do cordão e presença de mordeduras são muito sensíveis à correta montagem das vigas, minimizando ao máximo qualquer abertura presente na junta em ângulo. O alinhamento dos arames em relação à junta e a estabilidade de movimentação do pórtico se mostraram muito influentes para os critérios indicados acima. Para este tema, conclui-se que a não utilização de um seguidor de junta pode ter dificultado a obtenção de cordões ainda mais lineares, influenciando inclusive no dimensional das seções de solda avaliadas na macrografia. A ressecagem dos fluxos proporcionou a obtenção de cordões com pouca ou nenhuma porosidade, se mostrando uma etapa fundamental na garantia da qualidade visual e estrutural de componentes soldados pelo processo SAW.

De acordo com a avaliação qualitativa geral e a destacabilidade da escória, um dos principais critérios a ser avaliados em aplicações de alta produtividade envolvendo a soldagem por arco submerso, a combinação arame OK Autrod 12,22 + Fluxo C (F7A2-EM12K) demonstrou os melhores resultados,

dentro das condições e parâmetros de soldagem utilizados, seguidos pelos Fluxos D e A e por último, o Fluxo B.

Os resultados e relacionamentos com as propriedades dos fluxos apontam que a utilização de fluxos com escória do tipo básica e característica química neutra, são mais indicados para a soldagem em alta velocidade, em comparação com fluxos com escória do tipo rutilica com característica química ativa, caso do Fluxo B. A granulometria também foi outra propriedade relacionada com os resultados obtidos em altas velocidades (180 e 200 cm/min), principalmente na distinção do comportamento do Fluxo C, granulometria mais fina, para os fluxos D e A, granulometria mais grosseira. A avaliação das macrografias demonstrou que os dimensionais dos cordões obtidos com o Fluxo C foram mais uniformes, resultando em seções de solda desejáveis para uma junta em ângulo.

Os testes de resistência ao impacto apresentados pelo Fluxo C apontaram para valores de tenacidade abaixo dos valores mínimos exigidos em norma. Os resultados apontam para a realização de um reteste do fluxo, revisando os parâmetros e o procedimento de soldagem, tendo em vista futuras homologações por órgãos certificadores. Quanto aos aspectos econômicos, conclui-se que a importação dos fluxos C e D inviabilizam o objetivo de apresentar uma solução de baixo custo. Para este ponto, entende-se que o caminho oportuno seria avaliar a nacionalização dos consumíveis, utilizando-se de matéria prima e mão de obra locais, evitando assim também variações de mercado, como os custos de frete e oscilação do dólar. Vale ressaltar que o custo benefício dos consumíveis importados em relação aos nacionais deve ser melhor avaliado, comparando-se o consumo dos fluxos de maior custo com os de menores custos para realização de um cordão sob mesmas circunstâncias.

6. REFERÊNCIAS

ABNT NBR 5884 - Perfil I estrutural de aço soldado por arco elétrico - Requisitos gerais. 3. ed. Rio de Janeiro, RJ: ABNT, 2013. 32 p. ISBN 978-85-07-04233-4.

AWS D1.1/D1.1M:2020 - Structural Welding Code - Steel. 24. ed. USA: AWS, 2019. 664 p. ISBN 978-1-64322-087-1.

BRINGAS, John E. **Handbook of Comparative World Steels Standards**. 3. ed. USA: ASTM, 2004. 669 p. ISBN 0-8031-3042-2.

CASTRO, Moara Marques de. **Estudo da influência da adição de arame frio no processo de soldagem ao arco submerso com dois arames energizados: Aspectos operacionais e metalúrgicos**. Orientador: Paulo José Modenesi. 2017. 69 p. Dissertação (Mestrado em Engenharia Metalúrgica, Materiais e de Minas) - Universidade Federal de Minas Gerais (UFMG), Belo Horizonte, MG, 2017.

FORTES, Cleber. **Minicurso Arco Submerso**. Belo Horizonte, MG: [s. n.], 2009. 190 p.

FORTES, Cleber; ARAÚJO, Welerson. **Apostila de Arco Submerso**. Belo Horizonte: ESAB Comércio e Indústria LTDA, 2004. 84 p.

GUPTA, Deepak; BANSAL, Amit; JINDAL, Sandeep. Effect of fluxes in submerged arc welding for steel: A review. **Materials Today: Proceedings**, 3rd International Conference on Materials Science and Engineering, p. 1-8, 8 maio 2024. DOI <https://doi.org/10.1016/j.matpr.2024.05.053>. Acesso em: 20 jan. 2025.

HAYAJNEH, Mohammed T. et al. Optimization and control of bending distortion of submerged arc welding I-beams. **Journal of Constructional Steel Research**, Industrial Engineering Department, Jordan University of Science and Technology, P.O. Box 3030, Irbid, 22110, Jordan, v. 142, p. 78-85, 13 dez. 2017.

JUNIOR, Ronaldo Cardoso. **Avaliação da influência da energia de soldagem e da adição de arame frio em soldas SAW com arames geminados em aços inoxidáveis lean duplex UNS S32304**. Orientador: Paulo José Modenesi. 2018. 212 p. Tese (Doutorado em Engenharia Metalúrgica, Materiais e de Minas) - Universidade Federal de Minas Gerais (UFMG), Belo Horizonte, 2018.

MAROUÇO, Erick de Souza. **ESTUDO DAS PROPRIEDADES MECÂNICAS E MICROESTRUTURAIS DE METAIS DE SOLDAS OBTIDOS PELO PROCESSO ARCO SUBMERSO COM ELEVADA ENERGIA DE SOLDAGEM**. Orientador: Jorge Carlos Ferreira Jorge. 2014. 73 p. Dissertação (Mestrado em Engenharia Mecânica e Tecnologia de Materiais) - Centro Federal de Educação Tecnológica Celso Suckow da Fonseca (CEFET-RJ), Rio de Janeiro, 2014.

MARQUES, Paulo Villani; MODENESI, Paulo José; BRACARENSE, Alexandre Queiroz. **Soldagem - Fundamentos e Tecnologia**. 3. ed. rev. e aum. Belo Horizonte, MG: Editora UFMG, 2011. 363 p. ISBN 978-85-7041-748-0.

MENDES, Danielle Silva. **Efeito do aporte térmico e da adição de arame frio na zona termicamente afetada de um aço inoxidável lean duplex soldado ao arco submerso**. Orientador: Paulo José Modenesi. 2018. 70 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Metalúrgica, Materiais e de Minas) - Universidade Federal de Minas Gerais (UFMG), Belo Horizonte, MG, 2018.

MODENESI, Paulo José et al. **Introdução à Metalurgia da Soldagem**. Belo Horizonte, MG: [s. n.], 2012. 209 p.

OHARA, Masahiro et al. A new approach to avoiding undercut for high-speed submerged arc welding. **Journal of Japan Welding Society**, Welding Technology Laboratory, R & D Laboratories-II, Nippon Steel Corporation, Fuchinobe, Sagamihara 229., v. 51, 7 fev. 1986.

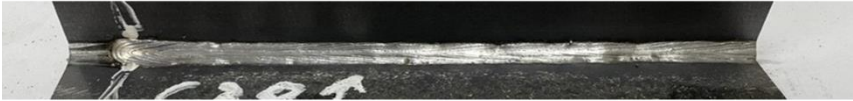
OSORIO, Alice Gonçalves et al. Estudo da transferência de elementos químicos do fluxo para o metal fundido na soldagem a Arco Submerso. **Revista Matéria**, Pelotas, RS, ano 2016, v. 21, n. 2, 4 fev. 2016. ISSN 1517-7076 artigo 11720, p. 510-524.

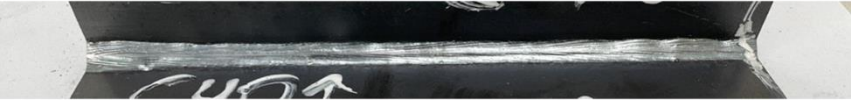
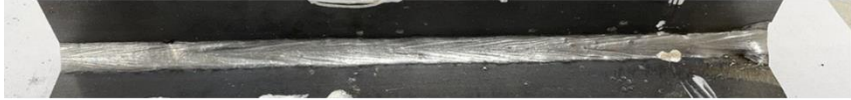
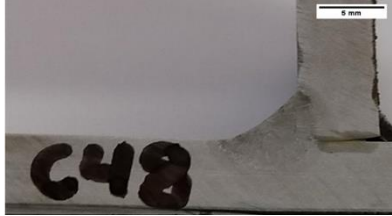
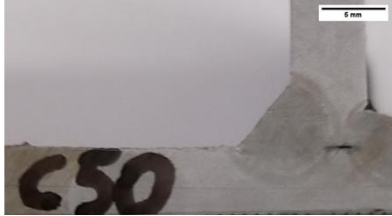
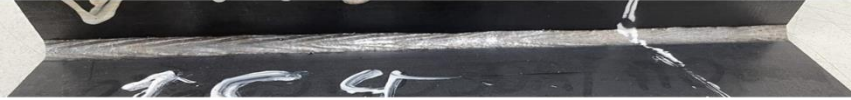
SHARMA, Lochan; CHHIBBER, Rahul. Study of weld bead chemical, microhardness & microstructural analysis using submerged arc welding fluxes for linepipe steel applications. **Ceramics International**, [S. l.], ano 2020, v. 46, p. 24615-24623, 24 jun. 2020. DOI <https://doi.org/10.1016/j.ceramint.2020.06.250>. Acesso em: 20 jan. 2025.

SILVA, Valdir Pignatta et al. **DIMENSIONAMENTO DE ESTRUTURAS DE AÇO**: Apostila para a disciplina PEF 2402 - ESTRUTURAS METÁLICAS E DE MADEIRA. São Paulo, SP: Departamento de Engenharia de Estruturas e Geotécnica Escola Politécnica da Universidade de São Paulo, 2012. 149 p.

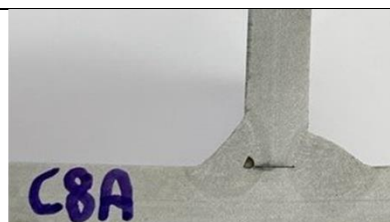
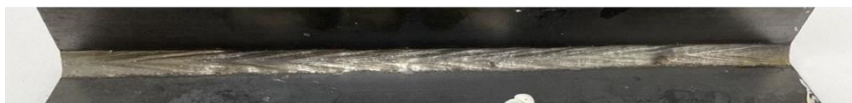
WANG, Zhanjun et al. A structure-oriented elucidation for viscous flow of SiO₂-MnO-Al₂O₃ fused submerged arc welding fluxes. **Journal of Non-Crystalline Solids**, [S. l.], v. 612, 25 abr. 2023. ISSN 0022-3093, p. 1-6. DOI <https://doi.org/10.1016/j.jnoncrysol.2023.122360>. Acesso em: 20 jan. 2025.

ANEXO A

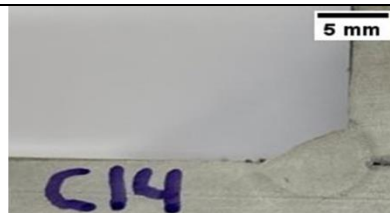
Fluxo A; 140 cm/min; Cordão C23	
	
Fluxo A; 160 cm/min; Cordão C25	
	
Fluxo A; 180 cm/min; Cordão C29	
	
Fluxo A; 200 cm/min; Cordão C33	
	
Fluxo B; 140 cm/min; Cordão C36	
	
Fluxo B; 160 cm/min; Cordão C38	
	
Fluxo B; 180 cm/min; Cordão C40	

	
Fluxo B; 200 cm/min; Cordão C42	
	
Fluxo C; 140 cm/min; Cordão C45	
	
Fluxo C; 160 cm/min; Cordão C46	
	
Fluxo C; 180 cm/min; Cordão C48	
	
Fluxo C; 200 cm/min; Cordão C50	
	
Fluxo D; 140 cm/min; Cordão C4	
	

Fluxo D; 160 cm/min; Cordão C8



Fluxo D; 180 cm/min; Cordão C14



Fluxo D; 200 cm/min; Cordão C18

