

INSTITUTO FEDERAL DE EDUCAÇÃO CIÊNCIA E TECNOLOGIA DE MINAS
GERAIS - *CAMPUS* BETIM
BACHARELADO EM ENGENHARIA MECÂNICA

Fernanda Lucia Moraes Dias

**DESENVOLVIMENTO E VALIDAÇÃO DE UMA ESPECIFICAÇÃO DE
PROCEDIMENTO DE SOLDAGEM (EPS) UTILIZANDO O ARAME E71T-1C**

Betim

2023

FERNANDA LUCIA MORAES DIAS

**DESENVOLVIMENTO E VALIDAÇÃO DE UMA ESPECIFICAÇÃO DE
PROCEDIMENTO DE SOLDAGEM (EPS) UTILIZANDO O ARAME E71T-1C**

Trabalho de Conclusão de Curso apresentado à banca examinadora do curso de Engenharia Mecânica do Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia de Minas Gerais *Campus* Betim, como parte dos requisitos para obtenção do título de Bacharel em Engenharia Mecânica.

Orientador: Prof. Dr. Gabriel Mendes de Almeida Carvalho

Betim

2023

FICHA CATALOGRÁFICA

M828d Dias, Fernanda Lucia Moraes
Desenvolvimento e validação de uma especificação de
procedimento de soldagem (EPS) utilizando o arame E71T-1C /
Fernanda Lucia Moraes Dias. – 2023.

59 f. : il.

Trabalho de conclusão de curso (Bacharelado em Engenharia
Mecânica) - Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia de
Minas Gerais, Câmpus Betim, 2023.

Orientador: Prof. Dr. Gabriel Mendes de Almeida Carvalho

1. Soldagem. 2. Ensaios mecânicos. 3. Resistência à tração. 4.
Arame. 5. Engenharia mecânica. I. Dias, Fernanda Lucia Moraes. II.
Título.

CDU: 621.791



MINISTÉRIO DA EDUCAÇÃO
SECRETARIA DE EDUCAÇÃO PROFISSIONAL E TECNOLÓGICA
INSTITUTO FEDERAL DE EDUCAÇÃO, CIÊNCIA E TECNOLOGIA DE MINAS GERAIS
Campus Betim
Diretoria de Ensino
Docentes Mecânica
Rua Itamarati - CEP 32677-564 - Betim - MG
3135976360 - www.ifmg.edu.br

ATA DE DEFESA DO TCC

Aos 12 dias do mês de dezembro do ano de 2023, às 19:30 horas, sob a presidência de Gabriel Mendes de Almeida Carvalho, o discente do Curso de Engenharia Mecânica, R.A nº 0029881 do IFMG – Campus Betim, defendeu o Trabalho de Conclusão de Curso (TCC) intitulado “DESENVOLVIMENTO E VALIDAÇÃO DE UMA ESPECIFICAÇÃO DE PROCEDIMENTO DE SOLDAGEM (EPS) UTILIZANDO O ARAME E71T-1C” e foi **APROVADO** com a nota 90, que está condicionada ao cumprimento dos procedimentos pós-defesa do TCC.

Caso seja aprovado, deverá apresentar o trabalho com as devidas modificações em formato pdf, em **05/01/2023** à Coordenação de TCC. O não cumprimento dos procedimentos pós-defesa de TCC até a data estipulada, implica em atribuição de nota ZERO e consequente **REPROVAÇÃO**.

Betim, 31 de janeiro de 2024.



Documento assinado eletronicamente por **Gabriel Mendes de Almeida Carvalho, Professor**, em 31/01/2024, às 14:32, conforme Decreto nº 10.543, de 13 de novembro de 2020.



Documento assinado eletronicamente por **Frederico Fernandes Reis, Usuário Externo**, em 31/01/2024, às 15:24, conforme Decreto nº 10.543, de 13 de novembro de 2020.



Documento assinado eletronicamente por **Fagner Guilherme Ferreira Coelho, Usuário Externo**, em 31/01/2024, às 19:45, conforme Decreto nº 10.543, de 13 de novembro de 2020.



Documento assinado eletronicamente por **Dante Otavio Silvano Cruz, Usuário Externo**, em 01/02/2024, às 21:45, conforme Decreto nº 10.543, de 13 de novembro de 2020.



A autenticidade do documento pode ser conferida no site <https://sei.ifmg.edu.br/consultadocs> informando o código verificador **1814826** e o código CRC **E09AB92F**.

23792.001800/2023-79

1814826v1

AGRADECIMENTOS

Gostaria de expressar minha profunda gratidão a todos aqueles que contribuíram para a realização deste trabalho. Primeiramente, um agradecimento especial à minha mãe, Kátia, e meu pai, Delbet, cujo amor e apoio foram fundamentais em cada etapa da minha jornada.

À minha família, pela presença constante e incentivo que me deram força para seguir em frente, agradeço imensamente.

Um agradecimento carinhoso ao meu namorado e aos meus amigos, especialmente por aqueles momentos de lazer e descontração, jogando e conversando, que foram essenciais para manter o equilíbrio e a alegria durante este processo.

Não posso deixar de expressar minha gratidão ao professor Gabriel Mendes Carvalho, meu orientador, cuja sabedoria, paciência e orientação foram fundamentais para a concretização deste trabalho.

Aos meus colegas de trabalho da Weir Esco, Renan, Tielly e Bruno, agradeço a colaboração, apoio e pelas valiosas discussões que enriqueceram este trabalho.

Por fim, minha sincera gratidão ao IFMG - Campus Betim, aos professores e servidores, cujo conhecimento, dedicação e apoio foram essenciais para o meu desenvolvimento acadêmico e profissional.

A todos vocês, meu mais sincero obrigado.

"Algumas pessoas vivem mais em 20 anos do que outros em 80. Não é o tempo que importa, é a pessoa."

Décimo Doutor (Doctor Who)

RESUMO

A soldagem com arame tubular, ou FCAW, é um processo que utiliza um arame revestido com fluxo para unir metais, sendo amplamente aplicado na indústria devido à sua alta taxa de deposição e versatilidade em diferentes materiais e condições de trabalho. Suas principais aplicações envolvem a construção de estruturas metálicas, fabricação de equipamentos pesados, soldagem de tubulações e em condições adversas, como vento e umidade. Este trabalho centrou-se na confirmação da viabilidade e eficácia da utilização do arame E71T-1C na união de chapas utilizadas em equipamentos como básculas, retomadoras e outros projetos direcionados ao setor de mineração. Essa investigação foi embasada no desenvolvimento e validação de uma Especificação de Procedimento de Soldagem (EPS). Para alcançar esse propósito, foi realizado um processo de soldagem de duas chapas com especificação S690QL utilizando o arame E71T-1C da marca Böhler. Seguindo os parâmetros definidos na pesquisa, conduziram-se testes para determinar se a junta produzida com tais especificações poderia resistir aos esforços relacionados a cada produto desenvolvido com esse tipo de junta. Os resultados indicaram que, embora a resistência da junta tenha sido inferior ao do metal de base, esta resistência foi considerada adequada para suportar os esforços necessários. Como considerações finais, pode-se afirmar que, apesar de algumas limitações observadas, o arame de soldagem E71T-1C apresenta-se como uma opção viável e eficaz para a soldagem de chapas S690QL, respeitando as especificações e parâmetros do procedimento.

Palavras-chave: Soldagem FCAW; Especificação de Procedimento de Soldagem (EPS); Arame E71T-1C; Resistência À Tração; Ensaio Mecânico.

ABSTRACT

The flux-cored arc welding, or FCAW, is a process that uses a flux-cored wire to join metals, being widely applied in the industry due to its high deposition rate and versatility in different materials and working conditions. Its main applications involve the construction of metal structures, manufacturing of heavy equipment, welding of pipelines, and in adverse conditions, such as wind and humidity. This work focused on confirming the feasibility and effectiveness of using the E71T-1C wire in the union of plates used in equipment such as truck bodies, buckets, and other projects directed to the mining sector. This investigation was based on the development and validation of a Welding Procedure Specification (WPS). To achieve this purpose, a welding process of two plates with S690QL specification using the E71T-1C wire from Böhler brand was carried out. Following the parameters defined in the research, tests were conducted to determine if the joint produced with such specifications could resist the efforts related to each product developed with this type of joint. The results indicated that, although the strength of the joint was lower than that of the base metal, this strength was considered adequate to withstand the necessary efforts. As final considerations, it can be affirmed that, despite some limitations observed, the E71T-1C welding wire presents itself as a viable and effective option for welding S690QL plates, respecting the specifications and parameters of the procedure.

Keywords: FCAW; Welding Procedure Specification (WPS); E71T-1C wire; Tensile Strength; Mechanical Testing.

LISTA DE ILUSTRAÇÕES

Figura 1 - Equipamentos para soldagem a arco com proteção gasosa	21
Figura 2 - Tipos de Transferência Metálica e seus Oscilogramas Típicos	27
Figura 3 - Posições das Placas de Teste para Soldas de Chanfro	29
Figura 4 - Classificação do Arame Utilizado no processo FCAW	34
Figura 5 - Fonte utilizada na Soldagem das Chapas.....	37
Figura 6 - Cabeçote de Alimentação Utilizado na Soldagem das Chapas	38
Figura 7 – Máquina Semiautomática de Corte por Oxicorte.....	39
Figura 8 – Máquina de Corte a Plasma.....	40
Figura 9 – Máquina de Corte a Água	41
Figura 10 – Posicionamento das Chapas para Soldagem.....	42
Figura 11 – Chapas Após o Processo de Soldagem (medidas em milímetros).....	44
Figura 12 - Dimensionamento final dos corpos de prova em milímetros	45
Figura 13 – Esquema da Realização de Passes na Soldagem.....	46
Figura 14 – Chapas Após o Processo de Soldagem.....	47
Figura 15 – Chapas Após o Ensaio de Dobramento	51
Figura 16 – Chapas com Processo de Soldagem sem Limpeza de Raiz e Junta Soldada com Trinca.....	52

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 - Propriedades mecânicas, metal de solda em geral (valores individuais típicos) do arame E71T-1 M/C.....	35
Tabela 2 - Parâmetros da Soldagem.....	42
Tabela 3 - Resultados das análises dos ensaios de tração.....	48
Tabela 4 - Resultados de EPS anterior	49
Tabela 5 - Resultados dos Ensaios de Dobramento	50

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

AWS – *American Welding Society*

CV – *Constant Voltage*

EPS – *Especificação de Procedimento de Soldagem*

FCAW – *Flux Cored Arc Welding*

GMAW – *Gas Metal Arc Welding*

GTAW – *Gas Tungsten Arc Welding*

MAG - *Metal Active Gas*

MIG – *Metal Inert Gas*

MPa – *MegaPascal*

SMAW – *Shielded Metal Arc Welding*

ZTA – *Zona Termicamente Afetada*

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO	13
1.1	Justificativa.....	14
1.2	Colocação do Problema.....	14
1.3	Objetivos	15
1.3.1	Objetivo Geral.....	15
1.3.2	Objetivos Específicos	15
1.4	Organização do Trabalho.....	15
2	FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA	16
2.1	O que é Soldagem	16
2.2	História	17
2.3	Processo de Soldagem FCAW	18
2.3.1	Tipo de Corrente.....	22
2.3.2	Tensão de Soldagem	22
2.3.3	Gases de Proteção.....	23
2.3.4	Tipos de Transferência.....	24
2.3.5	Fonte	27
2.4	Posições de Soldagem	28
2.5	Ensaio.....	29
2.5.1	Ensaio de Tração	30
2.5.2	Ensaio de Dobramento.....	31
3	MATERIAIS E MÉTODOS	32
3.1	Materiais	32
3.1.1	Chapas	32
3.1.2	Arame de Solda.....	33
3.1.3	Gases de Proteção.....	36
3.1.4	Fonte	37
3.1.5	Máquina de Corte por Oxicorte.....	38
3.1.6	Máquina de Corte a Plasma	39
3.1.7	Máquina de Corte a Água.....	40
3.2	Métodos.....	41
4	RESULTADOS E DISCUSSÃO	46
5	CONCLUSÃO	53
	REFERÊNCIAS.....	55

ANEXO A – MEDIÇÃO DOS PARÂMETROS DE SOLDAGEM - FCAW AWS D1.1	
ED 2020	56
ANEXO B – FICHA TÉCNICA DA CHAPA S690QL UTILIZADA	58
ANEXO C – FICHA TÉCNICA DO CONSUMÍVEL E71T-1C UTILIZADO.....	59

1 INTRODUÇÃO

A soldagem é um dos processos de união de metais mais importantes visto atualmente, e segundo Machado (1996, p. 2), “é [o grupo de processos de união dos materiais] que mais se destaca devido, principalmente, ao seu largo emprego e grande volume de atividades que envolve”. Isso porque pode ser aplicada em diferentes setores industriais, como por exemplo na fabricação de estruturas metálicas, equipamentos, componentes eletrônicos, veículos, componentes eletrônicos, construção naval e aeroespacial, entre outros. Trata-se de uma técnica segura, rápida, econômica e versátil.

“Pode-se dizer que a soldagem tem duas funções principais na indústria: (1) como um meio de fabricação e (2) para manutenção e reparo. Seria difícil encontrar uma única indústria que não utilize a soldagem em nenhuma dessas classificações.” (BOHNART, 2018, p. 13).

Bohnart também menciona que a soldagem é um processo que envolve uma série de fatores, como a escolha dos materiais, a preparação das peças, a escolha dos parâmetros de soldagem, a execução da soldagem e a análise da qualidade da junta soldada. Portanto, os soldadores devem possuir conhecimento e habilidade para realizar o processo com segurança e eficiência.

Para que a soldagem ocorra, é necessário o uso de consumíveis de solda, que são responsáveis pela união das peças metálicas. É fundamental selecionar adequadamente os tipos de consumível de solda, considerando suas características específicas, podendo afetar não apenas a qualidade e a eficiência da soldagem, mas também a produtividade do processo.

A Especificação de Procedimento de Soldagem, ou EPS, no processo de soldagem é essencial para contribuir para a eficiência e qualidade das operações. Ela é uma orientação de como um procedimento de soldagem deve ser executado, especificando fatores como tipo de arame, parâmetros de soldagem, preparação do material e técnicas a serem utilizadas.

É na EPS que os profissionais da soldagem encontram as informações necessárias para verificar se o material selecionado é compatível com os requisitos da junta e do projeto em questão e quais os parâmetros devem ser utilizados. Além disso, a EPS contribui para a padronização dos procedimentos de soldagem dentro

de uma organização, auxiliando que todas as operações sejam realizadas de forma consistente e em conformidade com as especificações do projeto.

1.1 Justificativa

A escolha do tema deste trabalho se deve à necessidade de desenvolver e validar uma Especificação de Procedimento de Soldagem para o arame E71T-1C. Estudos realizados indicaram que a implementação de um arame com as características informadas pelo fabricante traria benefícios em termos financeiros e atenderia bem aos projetos realizados na empresa. Também poderia alterar a qualidade da junta, visto que esta mudança pode trazer variações no processo e por isso, é fundamental que uma EPS adequada seja estabelecida. A implementação deste documento é um dos fatores que contribui para uma qualidade consistente na soldagem, reduzindo as variações inerentes à mudança de material e otimizando os recursos utilizados.

Ao focar no desenvolvimento e validação de uma EPS específica para o arame, este estudo busca proporcionar uma contribuição significativa para aprimorar seus processos de soldagem, garantindo qualidade, padronização e eficiência com o novo material.

1.2 Colocação do Problema

A Especificação de Procedimento de Soldagem foi realizada para avaliar e validar a substituição de um arame utilizado previamente por um de mesma especificação, com o objetivo de determinar se o mesmo realmente atende ou supera os padrões de qualidade na soldagem conforme indicação do fabricante, bem como testar sua resistência à tração e sua capacidade de dobramento em uma junta.

Este trabalho foca na criação e validação de uma Especificação de Procedimento de Soldagem específica para o novo arame, garantindo que a mudança não comprometa a integridade e qualidade do processo de soldagem e padronizar os critérios e parâmetros técnicos para sua utilização.

1.3 Objetivos

1.3.1 Objetivo Geral

Confirmar a viabilidade e eficácia da utilização do arame de soldagem E71T-1C por meio do desenvolvimento e validação de uma Especificação de Procedimento de Soldagem (EPS) com os parâmetros de soldagens especificados.

1.3.2 Objetivos Específicos

- a) Elaborar uma Especificação de Procedimento de Soldagem (EPS) para o arame;
- b) Confirmar se os parâmetros de soldagem escolhidos são adequados para aquele tipo específico de junta usando o arame E71T-1C;
- c) Validar a EPS através de testes práticos de soldagem, observando a qualidade e resistência das soldas;
- d) Analisar os resultados obtidos para determinar se o arame realmente atende aos padrões e exigências do processo.

1.4 Organização do Trabalho

Este trabalho é dividido em seções que abordam diferentes aspectos do estudo. Na primeira seção, é apresentada a introdução e a contextualização do assunto, além de apresentar os objetivos. Na segunda seção é fornecida a fundamentação teórica, a fim de fornecer embasamento conceitual e teórico essenciais para a compreensão do trabalho. No terceiro capítulo, são apresentados os materiais e métodos utilizados na pesquisa. No quarto capítulo, são mostrados e discutidos os resultados obtidos. Por fim, o quinto capítulo é reservado para a conclusão do trabalho.

2 FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA

2.1 O que é Soldagem

De acordo com Marques (2017, p. 3), existem duas categorias que podem ser divididos os métodos de união dos metais, são eles: “aqueles baseados na ação de forças macroscópicas entre as partes a serem unidas e aqueles baseados em forças microscópicas - interatômicas e intermoleculares”.

Os métodos baseados na ação de forças macroscópicas podem ser exemplificados pela parafusagem e rebitagem, em que Marques (2017, p. 3), retomando a citação anterior, destaca que “a resistência da junta é dada pela resistência ao cisalhamento dos elementos de fixação dos processos de união citados juntamente com forças de atrito resultantes de suas superfícies em contato”.

A brasagem, a soldagem e a colagem são exemplos do método de união baseado na ação de forças macroscópicas. Neste método, a união se dá através da aproximação dos átomos ou moléculas dos componentes que serão unidos ou destes componentes e um material intermediário que é incluído à junta. Marques (2017, p. 3), ao finalizar sua abordagem, destaca que para efetivação deste método, tal aproximação deve ser de distâncias mínimas capazes de estabelecer ligações químicas, especialmente ligações metálicas e de Van der Waals.

No aspecto da conceituação, cada publicação proporciona uma interpretação distinta da definição de soldagem.

A soldagem é “um processo de união que produz a coalescência de materiais ao aquecê-los à temperatura de soldagem, com ou sem a aplicação de pressão, ou pela aplicação de pressão sozinha, e com ou sem o uso de metal de adição.” (*AMERICAN WELDING SOCIETY*, 2001, p. 47).

Por outro lado, Bohnart (2018, p. 2) define soldagem como “a união de duas peças metálicas a uma temperatura alta o suficiente para causar amolecimento ou fusão, com ou sem aplicação de pressão, e com ou sem o uso de metal de adição.”.

A descrição oferecida por Wainer (2004, p. 1) apresenta uma definição similar: “Denomina-se soldagem ao processo de união entre duas partes metálicas, usando uma fonte de calor, com ou sem aplicação de pressão. A solda é o resultado desse processo.”.

Nesse contexto, Marques (2017, p. 4) também aponta que definições que sustentam que a soldagem é apenas a união de metais através da fusão não é completamente preciso, visto que “não apenas os metais são soldáveis e que é possível se soldar sem fusão”. Ele prossegue em sua argumentação, afirmando que a definição fornecida pela *American Welding Society* “é meramente operacional, não contribuindo com o aspecto conceitual”.

2.2 História

“Apesar de possuir aparência moderna, existem fortíssimos indícios de que a união de materiais já era praticada há cerca de quatro mil e oitocentos anos, nos vales dos rios Nilo e Tigre-Eufrates, principalmente por brasagem e fase sólida” (MACHADO, 1996, p. 2).

“A brasagem e a soldagem por forjamento têm sido utilizadas desde épocas remotas. Existe, por exemplo, no Museu do Louvre, um pingente de ouro com indicações de ter sido soldado e que foi fabricado na Pérsia, por volta de 4000 a.C.” (MARQUES, 2017, p. 10).

De acordo com Modenesi (2012, p. 1.2), a soldagem, tanto na antiguidade quanto na Idade Média, foi empregada na produção de armas e diversos utensílios de corte. Prosseguindo com o que foi exposto pelo autor, a soldagem por forjamento foi perdendo sua significância com a evolução de processos alternativos, como fundição, rebitagem e parafusagem. Sua relevância voltou a crescer quando houve descobertas marcantes durante o século XIX, dentre elas a como a invenção do arco elétrico e a descoberta do acetileno, por Sir Humphrey Davy e Edmund Davy, respectivamente. Além disso, houve o desenvolvimento de fontes de energia elétrica, o que impulsionou ainda mais a evolução da soldagem.

Durante a década de 1880, registrou-se a primeira instância documentada de soldagem por fusão, seguida da patente pioneira relacionada a um processo de soldagem. Este primeiro evento foi conduzido por Auguste Meritens, que soldou placas de bateria de chumbo utilizando um eletrodo de carbono. A subsequente patente foi solicitada por Benados e Olszewski, alunos de Meritens, após experimentações com o arco elétrico alimentado por baterias carregadas a partir de

dínamos de alta tensão. Esta patente baseou-se na utilização de eletrodos de carbono e uma fonte de energia elétrica.

O avanço da tecnologia de soldagem e sua utilização no setor industrial foi bastante moderado até o início do século XX. Bohnart (2017, p. 4) aponta que, antes da Primeira Guerra Mundial, a soldagem “era usada principalmente como meio de manutenção e reparo. As demandas da guerra por um fluxo aumentado de bens exigiam métodos aprimorados de fabricação.”

Wainer (2004, p. 1) ainda complementa que a soldagem experimentou um avanço significativo durante a Segunda Guerra Mundial, graças à sua aplicação na fabricação de navios e aeronaves soldadas.

“Os processos usados até então foram aperfeiçoados, novos processos foram desenvolvidos e novos equipamentos e tecnologias foram incorporados à soldagem” (MODENESI, 2012, p. 1.4). Em adição ao que foi dito, o autor complementa seu ponto de vista dizendo que progressos em campos distintos como a eletrotécnica, a eletrônica e a metalurgia, tiveram um papel fundamental na evolução da soldagem.

2.3 Processo de Soldagem FCAW

O processo de soldagem FCAW, ou *Flux-Cored Arc Welding*, que traduzindo para português significa Soldagem a Arco com Eletrodo Tubular é definido pela *American Welding Society* (2010, p. 19) como:

Um processo de soldagem a arco que utiliza um arco entre um eletrodo contínuo de metal de adição e a peça de solda. O processo é usado com gás de proteção proveniente de um fluxo contido no eletrodo tubular, com ou sem proteção adicional de um gás fornecido externamente, e sem a aplicação de pressão.

Conforme Bohnart (2018, p. 768), o equipamento necessário para executar este processo é essencialmente o mesmo utilizado para outros processos de soldagem por arco elétrico com gás de proteção, que seria fonte de alimentação de tensão constante e um mecanismo de alimentação contínua de arame. Por exemplo, o FCAW assemelha-se ao GMAW (Gas Metal Arc Welding, que traduzindo para português significa soldagem a arco com proteção gasosa), também conhecido como MIG/MAG, que é um “processo em que a união de peças metálicas é produzida pelo

aquecimento destas com um arco elétrico estabelecido entre um eletrodo metálico nu, consumível, e a peça de trabalho. (MARQUES, 2018, p. 221)”.

Tal semelhança se dá pelo uso do mesmo equipamento, diferindo apenas no tipo de arame e, em algumas circunstâncias, o FCAW não possui a necessidade de gás para geração e proteção do arco elétrico e do cordão de solda. As variáveis empregadas e os resultados obtidos também são similares aos vistos no processo soldagem a arco com proteção gasosa.

Enquanto o GMAW usa um arame maciço, o FCAW usa um arame tubular cuja parte exterior age como um condutor elétrico e que fornece a maior parte do metal que forma o cordão de solda. Já o núcleo do arame tubular é preenchido com um fluxo de vários materiais em pó responsável por várias funções, como a desoxidação e o refinamento do metal de solda, a adição de elementos de liga, o ajuste da composição química da solda, a estabilização do arco elétrico, o aumento da velocidade de deposição, a extensa formação de escória e a liberação de gás para proteção do arco e do cordão de solda, além de garantir a obtenção de uma geometria adequada para o cordão de solda, entre outras finalidades.

De acordo com Machado (1996, p. 158), este método teve início aproximadamente na década de 1920, aplicado em estruturas de grande porte na Alemanha. Contudo, era usado com eletrodos de bitola ampla e paredes espessas, o que impossibilitava o bobinamento do arame, resultando na fabricação e distribuição do consumível em pequenos segmentos.

O processo FCAW ganhou destaque na indústria na década de 1950, com o intuito de buscar melhorias nas propriedades metalúrgicas decorrentes do fluxo e da escória que formam o cordão de solda (BOHNART, 2018, p. 657). Sua popularidade cresceu nos tempos recentes devido ao aperfeiçoamento dos arames tubulares. Seu uso intensificou-se com a criação de arames mais finos, que facilitaram a soldagem em todas as posições e viabilizaram diferentes transferências metálicas, de acordo com os parâmetros (MACHADO, 1996, p.159).

Conforme Marques (2017, p. 249), houve uma intensificação na utilização desses materiais na década de 1990, período em que se desenvolveram arames com diâmetros inferiores a 1 mm. Esta redução no diâmetro facilitou a soldagem em todas as posições e viabilizou diferentes transferências metálicas, dependendo dos parâmetros utilizados (MACHADO, 1996, p.159).

Marques (2017, p. 261) ressalta que é muito empregado em setores como naval, nuclear, na construção de plataformas marítimas e na confecção de componentes de aço. Modenesi (2011, p. 21) adiciona que sua aplicação pode ser observada em soldagens de aço carbono, na montagem e manutenção de campo, bem como na soldagem de partes automotivas.

Quanto às características do FCAW, Modenesi (2011, p. 21) aponta vantagens como alta produtividade e eficiência, capacidade de soldagem em todas as posições, bom custo-benefício, soldas de ótima qualidade e visual. Entretanto, destaca também desvantagens, como o custo mais elevado do equipamento e a possível produção de grande quantidade de fumaça, além da necessidade de limpeza após a soldagem.

Machado (1996, p. 164) também salienta que uma desvantagem é o consumo elevado de gás de proteção, quando requerido, com uma vazão aproximadamente 40% superior à do processo MIG, ou *Metal Inert Gas*. Adicionalmente, o custo do consumível é quase três vezes mais alto que aquele empregado no MIG.

Bohnart (2017, p. 658) complementa sobre a vantagem da alimentação contínua do eletrodo:

Uma das principais vantagens é a eliminação de interrupções na soldagem devido à troca de eletrodos. Isso evita falhas de solda devido a inclusões de escória, sobreposição fria, penetração insuficiente, trincas em crateras e fusão inadequada, que podem ocorrer ao iniciar e parar para trocar os eletrodos.

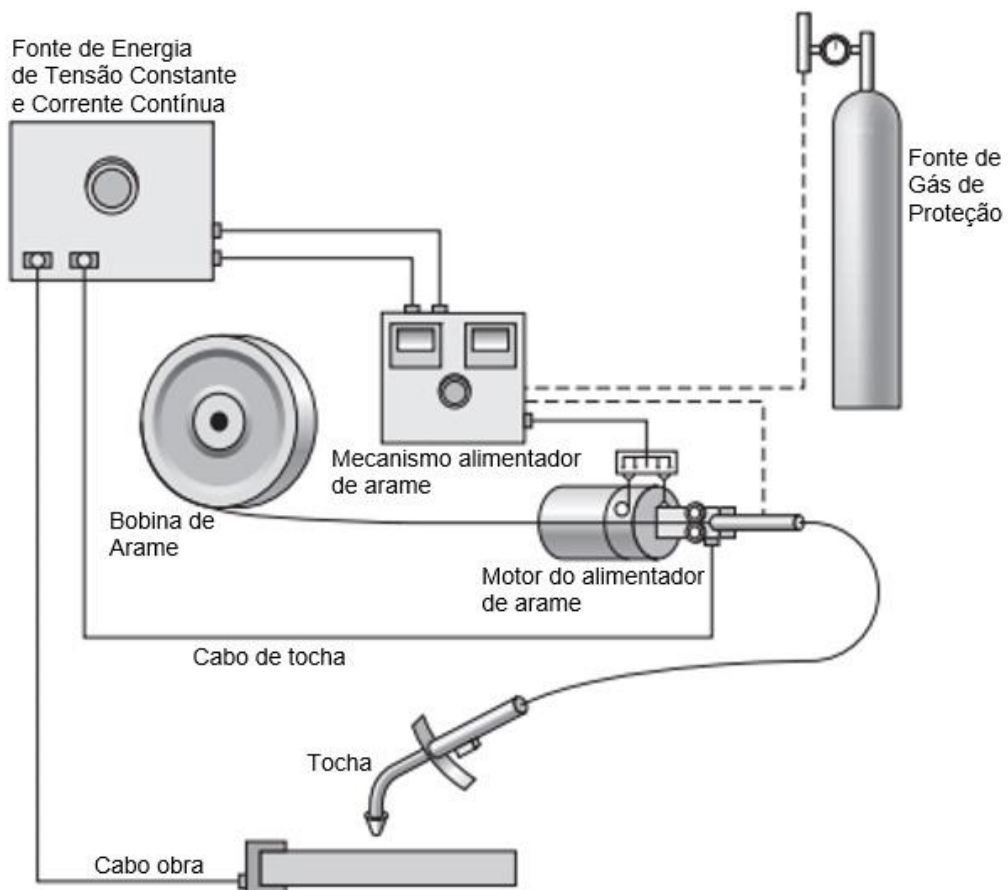
Neste processo, há duas modalidades: a soldagem com arame tubular auto-protegida, denominada FCAW-S (*Flux Cored Arc Welding Self-shielding*), e a soldagem com arame tubular com proteção gasosa, conhecida como FCAW-G (*Flux Cored Arc Welding Gas Shielded*).

Na variação FCAW-S, os componentes do fluxo se decompõem e produzem gases em quantidade suficiente para assegurar a proteção da área do arco elétrico e do cordão de solda, contando ainda com a escória para proteger o cordão. Apesar de possuir um equipamento mais simples, visto que não utiliza de bocais de gás, este método libera uma grande quantidade de gases. Assim, é recomendado para situações em que o uso de gás de proteção é dispensável e o acúmulo desses gases não seja um obstáculo.

No processo FCAW-G, é essencial o uso de um gás protetor adicional. Comumente, utiliza-se CO_2 puro ou suas misturas com argônio e, em algumas situações, com oxigênio, como citado por Machado (1996, p. 158). Assim, o equipamento deve incluir uma fonte de gás, reguladores de pressão e vazão, bem como mangueiras. Bohnart (2018, p. 756) complementa afirmando que nesse método "a ductilidade, penetração e resistência do metal soldado são aprimoradas, e o arame com núcleo de fluxo é ainda mais eficaz em metais base que estejam sujos ou corroídos."

Em ambas as variações a aplicação se dá principalmente de forma semi-automática. Na Figura 1, é apresentado o equipamento essencial para a soldagem FCAW, que consiste basicamente em uma fonte de energia, um mecanismo alimentador de arame, uma tocha de soldagem que varia conforme o método utilizado, seja FCAW-S ou FCAW-G e, para o FCAW-G, é necessária uma fonte de gás. Além disso, os cabos e o arame também estão incluídos no conjunto.

Figura 1 - Equipamentos para soldagem a arco com proteção gasosa



Fonte: adaptado de BOHNART, 2018.

2.3.1 Tipo de Corrente

Quando é Corrente Contínua com Polaridade Reversa, conhecida como CC+, que é quando os elétrons vão da peça de trabalho para o eletrodo, mais calor é direcionado para o eletrodo, resultando em uma penetração relativamente maior. Isso ocorre devido ao fato de os elétrons, ao aquecerem mais o eletrodo, produzirem uma gota mais quente. Quando esta gota atinge a peça, resulta em uma penetração maior. Segundo Bohnart (2018, p. 562), este tipo de corrente “também ajuda na remoção de óxidos da placa, o que contribui para um depósito de solda limpo e de alta qualidade”.

Na Corrente Contínua com Polaridade Direta, também conhecida como CC-, os elétrons movem-se do eletrodo até a peça de trabalho. Este processo possui uma maior concentração de calor na peça de trabalho. Porém, uma vez que as suas dimensões são superiores à do eletrodo, permite uma maior dissipação de calor, resultando conseqüentemente, em uma penetração menor em comparação à CC+.

Bohnart (2018, p. 709) argumenta que a instabilidade do arco na ponta do arame torna difícil direcionar a transferência do metal de solda. Wainer (2004, p. 107), por sua vez, explica que tal dificuldade surge porque a gota é impulsionada para cima, podendo causar um desvio em trajetória.

Quando utilizada a corrente alternada, uma escolha não muito comum, o arco apresenta instabilidade, já que a corrente e a voltagem ficam iguais a zero várias vezes por segundo devido à inversão de corrente. Nestas condições, a taxa de transferência de metal e a profundidade de penetração apresentam-se em níveis intermediários em comparação aos métodos mencionados anteriormente.

2.3.2 Tensão de Soldagem

A tensão de soldagem é o parâmetro que “controla o comprimento do arco (isto é, a separação entre o eletrodo e o metal base ou entre os eletrodos que mantêm o arco) e a largura do cordão de solda” (MODENESI, 2012, p. 10).

De acordo com Weiner (2004, p. 106), a tensão de soldagem do arco está diretamente relacionada ao seu comprimento, de modo que uma tensão baixa resulta em um arco de menor comprimento. O autor também menciona que, dependendo do valor da tensão, podem surgir defeitos na soldagem como porosidade, respingos

excessivos e mordeduras por causa de tensões elevadas; enquanto tensões baixas podem resultar em porosidade e sobreposição.

O aporte térmico também é um parâmetro muito influenciado pelo comprimento do arco e, portanto, pelo valor da tensão de soldagem. Quanto maior a tensão de soldagem, maior é o comprimento do arco e maior é o aporte térmico. Isso se dá porque um arco elétrico maior vai permitir uma maior transferência de calor, significando uma maior quantidade de energia que é fornecida para a peça de trabalho.

2.3.3 Gases de Proteção

Para Wainer (2004, p. 112), o tipo de gás de proteção tem influência no modo de transferência metálica, bem como nos formatos do arco e do cordão de solda. Marques (2016, p.242) complementa ainda que têm influência em fatores como “a penetração, a largura, a velocidade máxima de soldagem, a tendência ao aparecimento de mordeduras e o custo da operação”.

Conforme citado anteriormente, o FCAW apresenta duas variáveis: uma é auto protegida e não requer gás de proteção, enquanto a outra necessita desse gás. Na soldagem que utiliza gás de proteção, pode ser utilizado o dióxido de carbono (CO_2) ou combinações deste com argônio.

O CO_2 é um gás mais econômico em comparação ao Argônio, além de apresentar uma maior queda de tensão e gerar mais calor no arco elétrico devido à sua superior condutividade térmica. Isso beneficia a estabilidade do arco, reduz os respingos, intensifica a penetração e acelera a soldagem. No entanto, suas desvantagens incluem uma maior ocorrência de respingos e uma propensão elevada à porosidade.

Em determinados casos, usa-se uma combinação de CO_2 e argônio para aproveitar as qualidades de ambos os gases. A adição de argônio ao CO_2 aprimora a aparência da solda, reduz os respingos e estabiliza ainda mais o arco.

2.3.4 Tipos de Transferência

A transferência do metal fundido do eletrodo para a peça é determinada por interações complexas de forças.

Segundo as informações fornecidas por Marques (2017, p. 249), “a transferência metálica na soldagem com arames tubulares é semelhante à que ocorre na soldagem MIG/MAG”. Portanto, é possível identificar três principais modos de transferência do metal de adição do eletrodo para a peça. Esses modos são: transferência por curto-circuito, transferência globular e transferência por *spray*, ou aerossol.

O funcionamento da transferência globular, resultado de soldagens que utilizam altas tensões, pode ser explicado da seguinte forma:

Na transferência globular, a esfera de metal fundido na ponta do eletrodo pode crescer até atingir um diâmetro duas ou três vezes maior que o diâmetro do eletrodo antes de se separar dele e ser transferida através do arco.[...] A gravidade é a responsável pela maior parte da força atuante na transferência da gotícula (BOHNART, 2018, p. 662).

Wainer (2004, p. 103) ainda acrescenta que, como a gota formada possui um diâmetro maior que o eletrodo, maior a dificuldade para realizar a soldagem fora de posição.

A quantidade de calor inserida na peça que está sendo soldada possui um valor intermediário se comparado com outras formas de transferência. Esse tipo de transferência pode provocar problemas como penetração insuficiente, fusão inadequada ou excesso de reforço no cordão de solda.

Segundo Marques (2017, p. 223), a transferência por curto-circuito acontece ao se utilizar níveis baixos de tensão e corrente. Esta é comumente a técnica escolhida para soldagem em posições que não são planas ou ao juntar peças menos espessas.

Bohnart (2018, p. 664) afirma que na transferência por curto-circuito, não há transferência de metal através do arco elétrico. A transferência de metal ocorre apenas quando o eletrodo faz contato com o material que está sendo soldado.

“O fio do eletrodo é alimentado a uma taxa tão alta que a ponta derretida do fio de preenchimento entra em contato com a peça de trabalho antes que a gota possa se separar do eletrodo” (BOHNART, 2018, p. 664).

Modenesi (2011, p. 20) explica que durante esta transferência, a gota de metal derretido toca a poça de fusão entre 20 e 200 vezes por segundo, resultando em uma série de curtos-circuitos. Tal fenômeno é provocado pela interação entre as forças eletromagnéticas, geradas pela corrente elétrica que flui através do eletrodo e a peça em processo de trabalho, e a tensão superficial do metal fundido.

Algumas particularidades deste método de transferência são destacadas por Machado (1996, p. 197), tal como a formação de uma poça de fusão de tamanho relativamente pequeno, que solidifica rapidamente, o que o torna apropriado para a soldagem de seções finas em qualquer posição.

Este método de transferência é conhecido pela sua alta instabilidade no arco, o que pode levar à formação de respingos intensos. No entanto, através de uma adequada seleção dos parâmetros de soldagem e o ajuste preciso da indutância na fonte de energia, é possível minimizar a quantidade de respingos.

Segundo Marques (2017, p. 226), na transferência metálica *spray*, “as gotas de metal são pequenas, com diâmetro menor que o do eletrodo e seu número bastante elevado”.

Marques (2017, p. 225) também afirma que “a transferência por ‘*spray*’ só ocorre para determinados gases ou misturas de gases de proteção.” Isso se dá porque o gás de proteção deve ser capaz de fornecer energia suficiente para vaporizar o metal de solda e deve ter propriedades específicas que permitam uma transferência eficiente do metal.

De acordo com Wainer (2004, p. 105), em adição ao que foi proposto por Marques, essa transferência se dá “para elevadas densidades de corrente e quando se usa argônio ou misturas ricas em argônio como gás de proteção”. Por outro lado, gases como o CO₂ não são adequados para a transferência por *spray*, porque eles não fornecem energia suficiente e tendem a causar uma transferência instável.

Algumas vantagens da transferência por *spray* é que o cordão de solda obtido é suave e regular, ela é mais estável porque o arco é mais estável e não gera muitos respingos, ao contrário do que acontece na transferência por curto-circuito. Porém, de desvantagens, temos a necessidade de altas correntes, o que dificulta a sua aplicação na soldagem fora da posição plana ou em peças pouco espessas.

Segundo Modenesi (2011, p. 20), a razão para isso é que a poça de fusão tende a ser muito grande e de difícil controle e, nas peças com pouca espessura, há excesso de penetração.

Continuando o pensamento de Marques (2017, p. 226), ele afirma que, na transferência metálica por *spray*, "as gotas metálicas sofrem a ação de várias forças de origem eletromagnética, que se sobrepõem à ação da força gravitacional". Com base nessa afirmação, pode-se supor que esse tipo de transferência seria aplicável em qualquer posição, visto que a força gravitacional é consideravelmente mais fraca em comparação com a força eletromagnética, resultado da interação entre o arco elétrico e o campo magnético gerado pelas correntes elétricas envolvidas no processo.

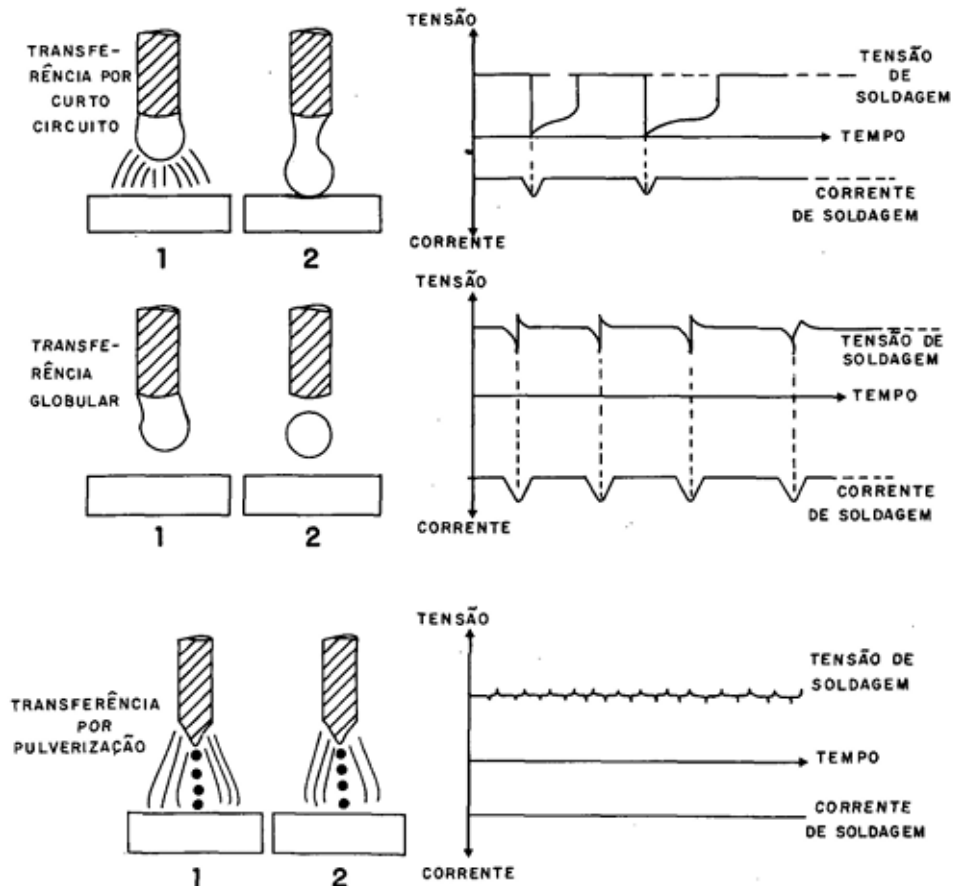
No entanto, como mencionado anteriormente por Modenesi (2011, p. 20), a transferência metálica por *spray* resulta em uma grande poça de fusão e requer correntes relativamente elevadas. Portanto, quando não é realizada em posição plana, torna-se difícil controlar a solda devido a esses fatores.

Algumas particularidades do processo de transferência por *spray* são destacadas por Bohnart (2018, p. 660):

A transferência por *spray* é um método de alta temperatura com deposição rápida de metal de solda. *Spray* descreve a forma como o metal fundido é transferido para a peça de trabalho. Gotículas muito pequenas de metal do eletrodo são transferidas rapidamente através do arco do eletrodo para a peça de trabalho. As gotículas têm tamanho igual ou menor que o diâmetro do arame de enchimento.

Na Figura 2 são apresentados os tipos de transferência metálica apresentados, juntamente com o estudo da variação da tensão e corrente por meio de técnicas oscilográficas durante a transferência metálica.

Figura 2 - Tipos de Transferência Metálica e seus Oscilogramas Típicos



Fonte: Wainer, 2004.

2.3.5 Fonte

Para realizar com sucesso o processo de soldagem, é essencial contar com ferramentas e equipamentos adequados. De acordo com Bohnart (2018, p. 279), sem essas condições, os soldadores enfrentarão dificuldades em executar um trabalho de qualidade caso disponham de equipamentos de baixa qualidade, tenham escassez de equipamentos ou escolham o tipo errado de equipamento para uma tarefa específica.

As fontes na soldagem desempenham um papel crucial na qualidade e eficiência do processo. A escolha adequada da fonte de energia permite o controle dos parâmetros de soldagem, garantindo resultados consistentes e de alta qualidade. Além disso, as fontes modernas oferecem maior eficiência energética e segurança, contribuindo para a redução de custos e a proteção dos operadores.

No entanto, é importante destacar que a escolha da fonte de energia na soldagem deve seguir alguns requisitos.

Uma fonte de energia para soldagem a arco deve atender a três requisitos básicos:

- Produzir saídas de corrente e tensão com características adequadas para um ou mais processos de soldagem
- Permitir o ajuste dos valores de corrente e/ou tensão para aplicações específicas;
- Controlar, durante a soldagem, a variação dos níveis de corrente e tensão de acordo com os requisitos do processo e aplicação.

(MARQUES, 2017, p. 47).

O processo FCAW, assim como o processo MIG/MAG, é comumente realizado utilizando uma fonte de energia com uma saída de tensão constante e um alimentador de arame de velocidade constante. Nesse sistema, tanto a tensão, o comprimento do arco quanto a velocidade do arame mantêm-se quase constantes durante o processo de soldagem devido ao sistema de controle automático que ajusta esses parâmetros para responder às variações durante a soldagem. Quando algum destes fatores varia, a fonte regula a corrente para mantê-los constantes. Os valores da corrente e do comprimento energizado do eletrodo são determinados a partir dessas condições e pela distância entre a tocha e a peça.

2.4 Posições de Soldagem

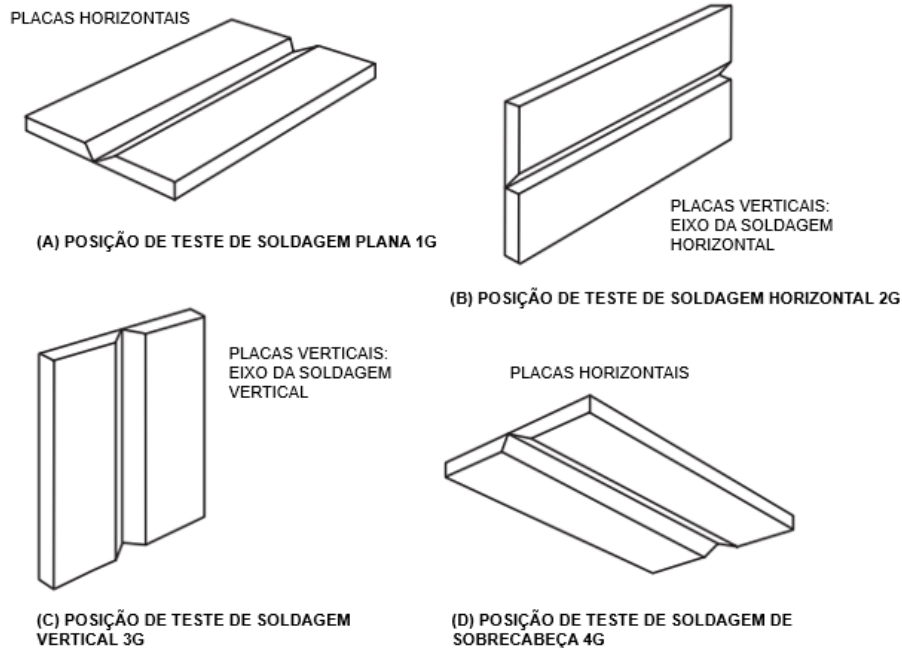
As posições de soldagem referem-se à orientação e ao ângulo entre a peça de trabalho e o equipamento de soldagem. A escolha da posição correta é vital, pois influencia diretamente a qualidade da solda, a penetração do material e a estabilidade do cordão de solda.

As posições de soldagem são classificadas de acordo com a posição da junta de solda durante o processo de soldagem. O sistema de classificação utiliza letras e números para denotar a orientação da peça de trabalho e a natureza da solda.

As posições de soldagem são categorizadas em planas, horizontais, verticais ou sobre-cabeça. Para soldas de filete, utiliza-se a designação com a letra F, enquanto para soldas de chanfro, utiliza-se a letra G.

As denominações 1G, 2G, 3G e 4G indicam as diferentes posições em que uma solda de chanfro pode ser realizada, sendo especialmente em testes para certificação. A Figura 3 ilustra cada uma dessas posições para tais testes.

Figura 3 - Posições das Placas de Teste para Soldas de Chanfro



Fonte: adaptado de AWS D1.1/D1.1M, 2015.

2.5 Ensaios

A realização de ensaios mecânicos em peças e corpos de prova é de suma importância no campo da engenharia, visto que proporcionam uma compreensão aprofundada das propriedades e comportamentos dos materiais sob diferentes condições de carga. Esses ensaios são cruciais em diversas etapas do processo produtivo, desde a escolha de materiais até a montagem final dos componentes, sendo realizados também nas peças durante sua operação para identificar e prever possíveis alterações, como o surgimento de trincas, fadiga ou de corrosão, por exemplo. Ao testar peças e corpos de prova, pode-se avaliar se o produto final atenderá às especificações e requisitos desejados. Assim, a prática de ensaios mecânicos é fundamental para contribuir com a integridade, confiabilidade e durabilidade dos produtos de engenharia.

O ensaio mecânico vai submeter um material a diferentes condições de carga ou deformação com o objetivo de determinar suas propriedades mecânicas. Entre as propriedades que podem ser avaliadas estão a resistência à tração, compressão, torção, dureza, impacto, fadiga e outras.

Após o ensaio, os corpos de prova frequentemente são examinados para análise de fraturas ou outros modos de falha. Isso pode fornecer informações sobre o comportamento do material.

Em relação aos testes em amostras soldadas, estes são importantes para verificar a qualidade da solda. Eles podem revelar defeitos como porosidade, rachaduras ou inclusões. Esses testes são também cruciais para certificar procedimentos de soldagem e para a homologação de soldadores, bem como para validar a eficácia e qualidade de um material conforme sua utilidade.

2.5.1 Ensaio de Tração

No ensaio de tração, um corpo de prova é progressivamente submetido a uma força progressiva com o objetivo de avaliar suas propriedades mecânicas, como capacidade de resistência e deformação. Estas forças são aplicadas perpendicularmente à seção transversal do material, visando seu alongamento. Durante o teste, é possível observar e analisar diversas propriedades mecânicas do material.

O limite de elasticidade indica até onde o material pode ser deformado e ainda retornar ao seu estado original após a remoção da carga. O ponto de escoamento indica quando ocorre deformação permanente do material, a transição entre a deformação elástica e a deformação plástica, enquanto o limite de resistência à tração é o ponto máximo de tensão que o material suporta sem se romper. Segundo Callister (2016, p. 209), “Se essa tensão for aplicada e mantida, ocorrerá fratura. Toda deformação até esse ponto está uniformemente distribuída por toda a região estreita do corpo de prova de tração”.

Callister (2016, p. 210) ainda complementa sobre o uso destas propriedades em projetos.

Normalmente, quando a resistência de um metal é citada para fins de projeto, a resistência ao escoamento é o parâmetro utilizado. Isso ocorre porque, no momento em que a tensão correspondente ao limite de resistência à tração chega a ser aplicada, com frequência a estrutura já sofreu tanta deformação plástica que já se tornou imprestável. É por essa razão que em geral as resistências à fratura não são especificadas para fins de projeto de engenharia.

Além disso, o limite de ruptura indica a tensão máxima atingida imediatamente antes da falha do material, e a estricção refere-se à redução percentual na área da seção transversal após a ruptura.

2.5.2 Ensaio de Dobramento

O ensaio de dobramento permite uma avaliação qualitativa da ductilidade dos materiais, que é a capacidade de se deformar plasticamente antes de ocorrer a fratura. Durante o ensaio, o corpo de prova é sustentado por dois roletes, alinhados de acordo com o tamanho do material em análise. Uma força é exercida pelo cutelo, fazendo o material fletir em função da carga aplicada e do ângulo de severidade, referido como α . Este ensaio é predominantemente qualitativo.

No contexto de soldas, o ensaio de dobramento tem como finalidade a certificação de soldadores e a validação de métodos de soldagem.

Os ensaios de dobramento são conhecidos por sua execução simples e rápida. Apesar de sua precisão limitada, eles oferecem uma perspectiva sobre a ductilidade dos metais e como diferentes processos impactam suas propriedades.

3 MATERIAIS E MÉTODOS

3.1 Materiais

Para realizar as juntas soldadas neste estudo, foram utilizados diversos materiais e máquinas específicas. Os materiais foram cuidadosamente escolhidos levando em consideração suas propriedades e adequação para o processo de soldagem em questão.

Os materiais utilizados incluem as chapas, os arames de solda e os gases de proteção, que serão especificados a seguir. Cada material desempenhou um papel crucial na formação das juntas soldadas, garantindo a integridade e a resistência necessárias.

Além disso, máquinas e equipamentos especializados foram empregados para realizar o processo de soldagem. Entre eles, destacam-se a máquina de solda e o cabeçote de alimentação. Essas máquinas e equipamentos desempenharam um papel fundamental na execução das soldas, proporcionando controle preciso dos parâmetros de soldagem e garantindo a qualidade das juntas formadas.

3.1.1 Chapas

Para a soldagem com o arame E71T-1C, foram utilizadas duas chapas de aço carbono que atendem aos requisitos da European Standard EN 10025-6 para o grau S690 e suas espessuras e se encontram em conformidade com a classe S690QL. Isso significa que a resistência mínima ao escoamento do material é de 690 MPa. Esta resistência ao escoamento é uma propriedade crucial que indica a quantidade de tensão que a chapa de aço pode suportar sem deformação permanente. Já a resistência à tração da chapa varia entre 780 e 930 MPa, para espessuras que vão de 4 a 53 mm.

O 'S' na designação indica que é uma chapa de aço '*Structural*' ou estrutural, ou seja, destinada a aplicações estruturais. A letra 'Q' representa '*Quenched*', ou temperado em português, indicando que o aço foi submetido a um tratamento térmico de têmpera.

A letra 'L' denota 'Low', traduzido como baixo, que sinaliza que o aço possui baixas temperaturas de entalhe, indicando alta resistência a fraturas. Então, a combinação de 'Q' e 'L' sugere que o aço é temperado e altamente resistente, mesmo em baixas temperaturas.

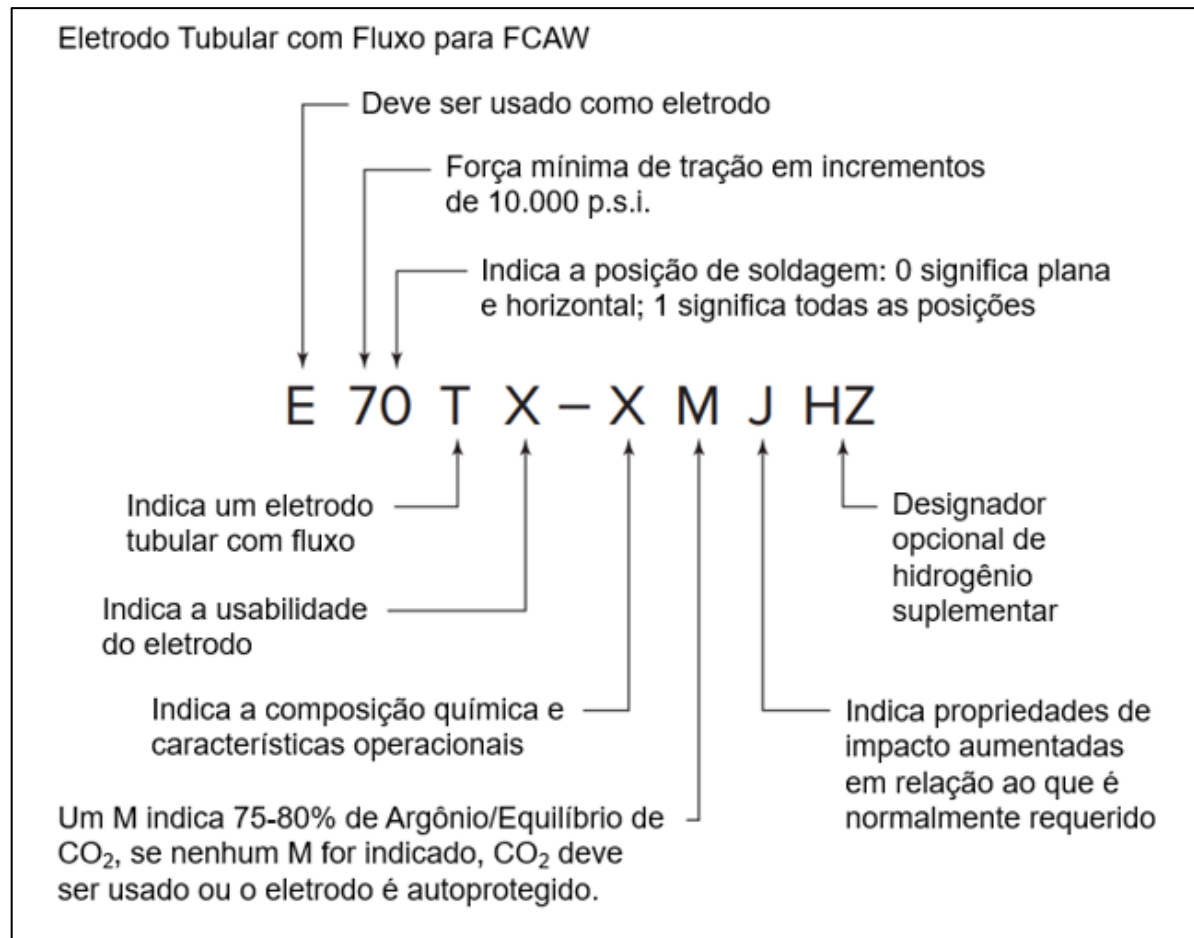
A ficha técnica deste material, que se encontra no ANEXO B, destaca algumas de suas características distintas. A chapa possui uma capacidade de dobra e qualidade de superfície excelentes, proporcionando excelente soldabilidade com resistência e tenacidade superiores na zona termicamente afetada (ZTA). Além disso, sua consistência ao longo da chapa é assegurada por tolerâncias estreitas, enquanto sua alta resistência ao impacto contribui para uma boa resistência contra trincas.

3.1.2 Arame de Solda

A seleção adequada do arame de solda é de extrema importância para garantir as propriedades mecânicas desejadas no material soldado. Cada aplicação requer diferentes características e desempenho do material de soldagem, e o arame de solda desempenha um papel fundamental nesse processo. Ao escolher o arame de solda correto, é possível garantir a resistência necessária para suportar as cargas e solicitações mecânicas a que o material soldado será submetido. A resistência é uma propriedade crucial, especialmente em estruturas e componentes que exigem alta capacidade de carga e resistência a tensões.

As classificações dos arames de solda são compostas por letras e números que oferecem informações detalhadas sobre o arame. As especificações para o tipo de arame utilizado no trabalho, que é um eletrodo tubular com fluxo, podem ser vistas na Figura 4 a seguir.

Figura 4 - Classificação do Arame Utilizado no processo FCAW



Fonte: adaptado de Bohnart, 2018.

A Tabela 1 a seguir apresenta as propriedades mecânicas do arame E71T-1 M/C. É importante ressaltar que as propriedades mecânicas podem variar entre diferentes marcas e especificações de arame de solda. Portanto, a tabela apresentada reflete as características específicas do arame de solda utilizado neste estudo e deve ser considerada como um guia para auxiliar na seleção adequada do material de soldagem. A ficha técnica do material se encontra no ANEXO C.

Tabela 1 - Propriedades mecânicas, metal de solda em geral (valores individuais típicos) do arame E71T-1 M/C

Gás de proteção	Condição	Limite de escoamento $R_{p0.2\%}$ MPa	Resistência à tração R_m MPa	Elongação A ($L_0=5d_0$) %	Tenacidade ao impacto CVN ISO-V KV J	
					+20°C	-20°C
M21	Soldado	530 (≥ 460)	600 (530 – 680)	28 (≥ 20)	130	100 (≥ 47)
C1	Soldado	480 (≥ 460)	540 (530 - 680)	30 (≥ 20)	110	90 (≥ 47)

Fonte: Adaptado de voestalpine Böhler Welding Group [2021]

O arame utilizado neste caso foi o da marca Böhler de 1,2 mm de diâmetro e, conforme observado na Tabela 4, existem dois tipos de arame com a mesma especificação. O C1, que foi empregado nas análises desta pesquisa, tem sua composição definida, em porcentagem em relação ao peso, por 0,04 de Carbono, 0,45 de Silício e 1,3 de Manganês. Ele requer um gás de proteção composto por 100% CO_2 . Por outro lado, o M21 exige uma mistura de 75% - 80% de argônio e o restante de CO_2 .

Pela Tabela 1, também se percebe que a resistência a tração do arame E71T1 é de 540 MPa, atendendo também resistências entre 530 e 680 MPa.

Este arame, utilizado principalmente em construções de aço em geral e na indústria naval, possui múltiplas características de destaque. Entre elas, pode-se citar as excelentes propriedades mecânicas, a facilidade para eliminar escória e a mínima perda por respingos. Além disso, oferece uma superfície de cordão suave com pequenas ondulações e permite a soldagem em todas as posições. Este arame é adequado para uso em aços com um limite de escoamento de até 460 MPa (67 ksi), requer menos limpeza pós-soldagem, oferece flexibilidade para usar diferentes gases de proteção, é de fácil manuseio e pode ser utilizado com ampla variedade de parâmetros.

Com base nessas especificações, é possível escolher os materiais adequados e ajustar os parâmetros de soldagem de acordo com os requisitos proporcionados. A escolha adequada do arame de solda é crucial para favorecer as propriedades mecânicas desejadas no material soldado, promovendo a resistência, ductilidade, tenacidade e outras características necessárias para atender às exigências da aplicação específica. Isso contribui para a segurança, confiabilidade e eficiência das estruturas e componentes que dependem de uma soldagem de qualidade.

3.1.3 Gases de Proteção

Quanto ao gás de proteção, foi utilizado 99,99% de dióxido de carbono, ou CO_2 , para proteção da solda.

O dióxido de carbono (CO_2) é um gás que contribui para a estabilidade do arco elétrico, já que o calor do arco de soldagem decompõe o dióxido de carbono em monóxido de carbono e oxigênio. O oxigênio ajuda a estabilizar o arco e promove uma melhor transferência de metal do eletrodo para a peça de trabalho. Contudo, pode levar a uma maior oxidação.

O CO_2 também proporciona uma penetração mais profunda e uma maior taxa de transferência de metal do eletrodo para a poça de solda, o que pode causar mais respingos. Esse composto químico possui densidade de aproximadamente $1,98 \text{ kg/m}^3$, o que representa cerca de 1,53 vezes a densidade do ar. Esse fator confere a ele uma excelente proteção d arco elétrico.

De acordo com a Fundação *James F. Lincoln Arc Welding* (2000, p. 4.1-17), quando se é utilizado esse gás, o metal pode ser transferido de maneira globular ou por curto-circuito.

Também pode ser encontrado em misturas com 75% de argônio e 25% de CO_2 . A razão para isso é que esta combinação oferece um equilíbrio melhor de características de soldagem que ambos os gases proporcionam, como boa estabilidade do arco, bom controle da poça de solda, boa aparência da solda e minimização de respingos.

3.1.4 Fonte

A fonte utilizada foi a Lincoln Flextec 450, mostrada na Figura 5 a seguir, que é uma fonte de energia de soldagem do tipo inversora. Isso significa que a máquina converte a corrente alternada da rede elétrica em corrente contínua em uma frequência muito mais alta, alterando o valor da tensão em relação à entrada.

Figura 5 - Fonte utilizada na Soldagem das Chapas



Fonte: autoria própria.

Quanto aos parâmetros que podem ser ajustados na Flextec 450, pode ser escolhido o processo de soldagem, como GTAW (soldagem a arco de gás tungstênio), SMAW (soldagem a arco elétrico com eletrodo revestido), CV (usado para os processos GMAW MIG ou FCAW-G, que significam soldagem a arco com proteção gasosa com gás inerte e soldagem a arco com arame tubular com gás de proteção, respectivamente) ou CV-Innershield (soldagem a arco com arame tubular auto protegido). Este parâmetro basicamente controla se terá tensão ou corrente constante. Também é possível alterar o controle de saída (local/remoto), onde o modo remoto define a corrente máxima, e controle do arco, que funciona como um controle

de indutância. No seu visor, aparecem os valores de corrente e tensão, que podem ser ajustados no cabeçote de alimentação.

O cabeçote de alimentação utilizado foi o Linc Feed 33, ou LF33, que é um componente essencial de um sistema de alimentação de arame para soldagem FCAW e está apresentado na Figura 6. Ele possui um conjunto de rolos que empurram o arame de solda do carretel através da mangueira até a tocha de solda e tem a função de controlar a taxa de alimentação do arame de solda, alimentando-o de maneira constante e controlada através da tocha de solda para o ponto de solda.

O cabeçote de alimentação LF33, além da velocidade de alimentação, também permite o controle da tensão de saída.

Figura 6 - Cabeçote de Alimentação Utilizado na Soldagem das Chapas



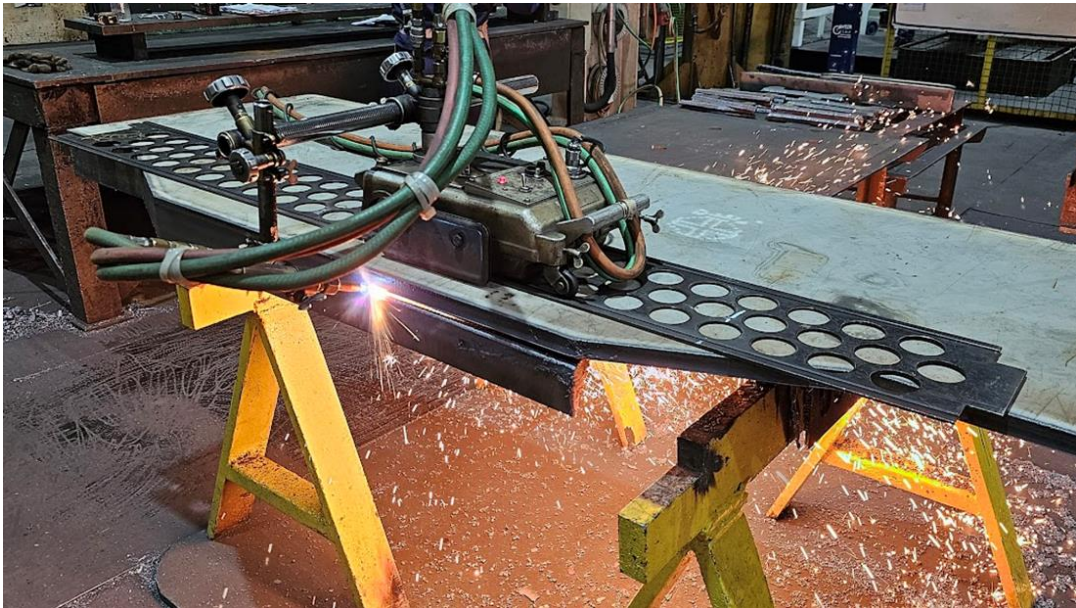
Fonte: autoria própria.

3.1.5 Máquina de Corte por Oxicorte

O processo de oxicorte é utilizado para cortar metais utilizando uma chama que é produzida pela combustão de um gás combustível (frequentemente o acetileno) combinado com oxigênio. Esse método é eficaz e econômico, especialmente para cortar ferro e aço em espessuras consideráveis.

A Máquina de Oxicorte Semiautomática Portátil, também conhecida como "Tartaruga", é um equipamento que se desloca de forma lenta e controlada ao longo de um trilho enquanto porta uma tocha que realiza o oxicorte. Este é um equipamento realiza cortes principalmente de chanfros e lugares de difícil acesso, além de garantir uma maior precisão visto que o trilho facilita o manuseio e a operação.

Figura 7 – Máquina Semiautomática de Corte por Oxicorte



Fonte: autoria própria.

3.1.6 Máquina de Corte a Plasma

A máquina de corte a plasma é uma ferramenta capaz de cortar materiais eletricamente condutores como aço, alumínio e outros metais com precisão e eficiência utilizando um jato de gás superaquecido, ou plasma. Durante a operação, ocorre o derretimento do material enquanto um fluxo de gás expulsa o material derretido, resultando em cortes limpos e rápidos.

Utilizou-se a MESSER Multitherm 4000 equipada com uma tocha, duas bancas medindo 3010 mm x 6215 mm e uma fonte Hypertherm plasma XPR 260 XD. Esta máquina é capaz de cortar materiais com espessuras de 5/16" (7,94 mm) a 1.1/2" (38,10 mm). A referida máquina é ilustrada na Figura 8 abaixo.

Figura 8 – Máquina de Corte a Plasma



Fonte: autoria própria.

3.1.7 Máquina de Corte a Água

A máquina de corte a água é uma ferramenta de corte que utiliza um jato de água em alta pressão para cortar uma variedade de materiais, desde metais até cerâmicas e plásticos. Este processo não produz zonas afetadas pelo calor, o que evita alterações nas propriedades do material. É capaz de produzir cortes precisos e limpos e é utilizado em aplicações que exigem alta precisão.

Utilizou-se a máquina FLOW WATER JET, modelo M500 3060 XD, que vem equipada com cabeçotes de alta pressão para cortes 2D e 3D. Esta possui uma banca de trabalho de 3875 mm x 6830 mm e é capaz de cortar materiais até uma espessura máxima de 5/16" conforme os materiais adotados pela empresa. A máquina referida pode ser vista na Figura 9 a seguir.

Figura 9 – Máquina de Corte a Água



Fonte: autoria própria.

3.2 Métodos

Para a realização do trabalho, as duas chapas de S690QL foram cortadas usando uma máquina de corte a plasma.

Para criar o ângulo de bisel, que é o ângulo formado em uma extremidade da chapa antes da mesma ser soldada, foi utilizado o processo de corte por oxicorte semiautomático (Tartaruga). Este corte foi feito em uma das bordas de 400 mm de cada chapa, produzindo um ângulo de bisel de 30° com 22 mm de profundidade, resultando em um chanfro de 60°.

Em seguida foi realizada a montagem e fixação das chapas.

O resultado destas etapas acima é mostrado na Figura 10 a seguir.

Figura 10 – Posicionamento das Chapas para Soldagem



Fonte: autoria própria.

O processo de soldagem foi iniciado após o alinhamento das chapas. Uma visão geral dos parâmetros utilizados neste processo podem ser encontrados na Tabela 2. Os parâmetros específicos de cada passe se encontram no ANEXO A.

Tabela 2 - Parâmetros da Soldagem

(continua)

Ø (mm)	Passe	Temp. (° C)	Corrente (A)	Tensão (V)	Vel. (cm/min)	Vel. alimentação arame (m/min)	Aporte térmico máx. (J/cm)
1,2	1	20	165	25	10	8,2	25.265,60
1,2	2	125 a 300	205	27	25,3	10,6	13.146,00

Tabela 2 - Parâmetros da Soldagem

(conclusão)

Ø (mm)	Passe	Temp. (° C)	Corrente (A)	Tensão (V)	Vel. (cm/min)	Vel. alimentação arame (m/min)	Aporte térmico máx. (J/cm)
1,2	3 e 4	125 a 300	210 a 215	27	18,9 a 27	10,7 a 10,8	18.002,00
1,2	5 e 6	125 a 300	195 a 210	27	25,5 a 26,1	10,3 a 10,7	13.325,00
1,2	7 a 11	125 a 300	175 a 205	25 a 27	29,6 a 32,9	8,3 a 10,4	11.208,00
1,2	12	125 a 300	180	25	34,3	8,3	7.875,00
1,2	13 e 14	125 a 300	175 a 210	25 a 27	22 a 37,5	8,2 a 11,1	15.451,00

Fonte: Adaptado de Esco Weir [2022]

Para encontrar o aporte térmico, utilizou-se a fórmula $Q = \frac{k \cdot U \cdot I \cdot 60}{v}$, onde Q é o aporte térmico em Joules por centímetro (J/cm), k é a eficiência térmica do processo que consideramos 0,6, U é a tensão em Volts (V), I é a corrente em Ampere (A) e v é a velocidade de alimentação do arame em metros por minuto (m/min).

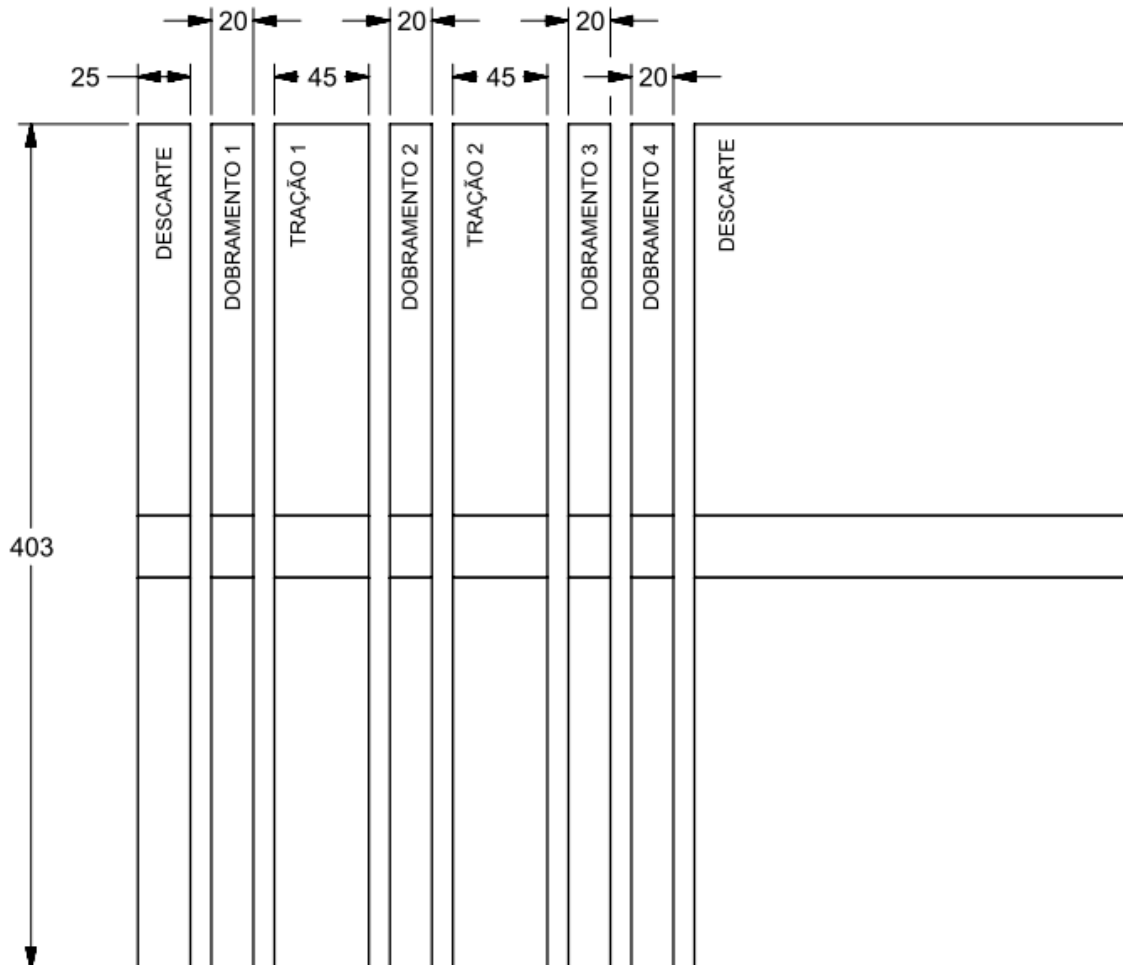
Foi empregado o processo de soldagem FCAW (*Flux Cored Arc Welding*) para unir as chapas. Nesse processo, as chapas foram soldadas perpendicularmente uma à outra na posição 2G, que seria uma solda de chanfro na posição horizontal.

O tipo de corrente utilizado foi do tipo Corrente Contínua com Polaridade Reversa, conhecida como CC+. Para garantir a proteção adequada durante a soldagem, foi utilizado um gás composto por 99,99% de dióxido de carbono (CO₂) como gás de proteção.

Posteriormente, as chapas soldadas foram encaminhadas para o corte a água, gerando amostras destinadas aos testes subsequentes.

Os dimensionais de corte adotados seguiram a norma da AWS D1.1-20 e estão detalhados na Figura 11, que também apresenta a finalidade de cada segmento cortado. Observa-se que, de um total de 6 corpos de prova, dois foram destinados ao ensaio de tração e quatro ao de dobramento.

Figura 11 – Chapas Após o Processo de Soldagem (medidas em milímetros)

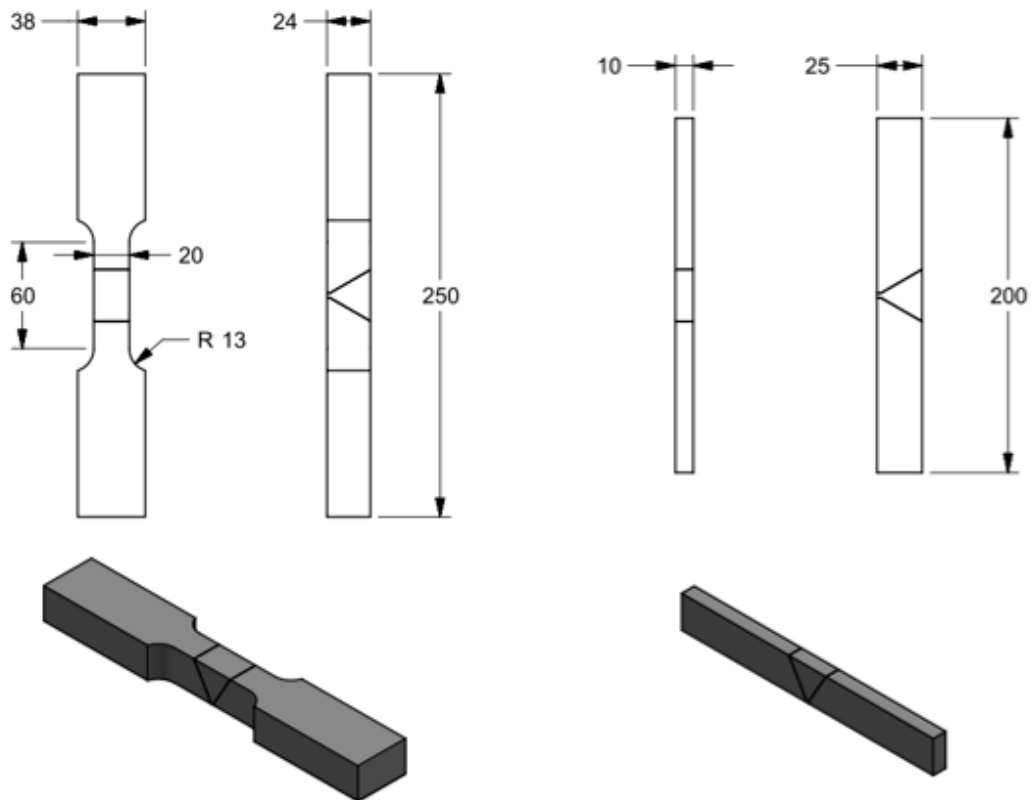


Fonte: autoria própria.

Em seguida, as amostras passaram por um novo corte. Aquelas destinadas ao ensaio de dobramento foram reduzidas para 210 mm de comprimento, enquanto as para o ensaio de tração foram reduzidas para 300 mm.

As seis amostras então foram usinadas utilizando um centro de usinagem a fim de ficarem com os dimensionamentos especificados na Figura 12.

Figura 12 - Dimensionamento final dos corpos de prova em milímetros



Fonte: autoria própria.

Durante a soldagem da junta, foram observados diferentes parâmetros, como o tempo de preparação, o tempo de soldagem e o número de passes realizados. Essas informações foram importantes para avaliar a eficiência do processo de soldagem.

Após a conclusão da soldagem, os corpos de prova foram submetidos a análises de tração e dobramento para avaliar sua resistência.

4 RESULTADOS E DISCUSSÃO

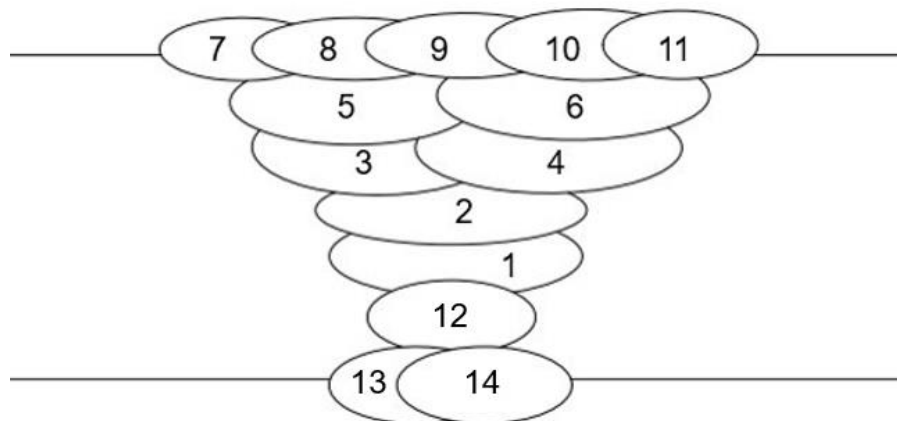
Na chapa de especificação S690QL de 1" (25,4 mm) de espessura, foram feitos cortes que resultaram em duas peças de 400 mm x 200 mm, um processo que levou 2,6 min (156 s).

O procedimento utilizado para criar o ângulo de bisel demandou um tempo total de 6 minutos, equivalente a 360 segundos. Já a fase de montagem e fixação das chapas consumiu aproximadamente 12,23 minutos, o que corresponde a cerca de 734 segundos.

Para o processo de soldagem das duas chapas, foram seguidos os passos para garantir uma solda de qualidade. Primeiramente, foi feita uma verificação minuciosa das chapas, certificando-se de que estavam limpas e livres de qualquer tipo de contaminante, como óleo, tinta ou ferrugem. Esses resíduos podem prejudicar a qualidade da solda, portanto, sua remoção adequada é essencial.

Após a preparação das chapas, procedeu-se com a soldagem da junta. Os passes foram realizados na ordem mostrada na Figura 13 a seguir.

Figura 13 – Esquema da Realização de Passes na Soldagem



Fonte: autoria própria.

O resultado da soldagem pode ser visualizado na Figura 14 a seguir.

Figura 14 – Chapas Após o Processo de Soldagem



Fonte: autoria própria.

No reverso da chapa, foi necessário realizar goivagem utilizando um eletrodo de grafite, um método de remoção de material. O objetivo era extrair o passe de raiz, que representa a primeira camada de solda da junta. Esta etapa se torna essencial devido à folga de 3 mm entre as chapas, que pode levar a contaminações na solda, podendo gerar porosidade e inclusões. Nesse procedimento, utilizou-se a mesma máquina de solda, ajustada para o modo goivagem.

Visualmente, foi evidente que os parâmetros utilizados na máquina de solda resultaram em um tipo de transferência metálica conhecida como "globular". Isso foi constatado devido à formação de gotas de diâmetro maior do que o do eletrodo durante o processo de soldagem.

Observa-se que a chapa foi submetida a procedimentos de limpeza para remover respingos de solda e imperfeições da chapa, utilizando-se um esmeril para essa finalidade.

A chapa foi posteriormente submetida a um processo de corte a água e passou pelo centro de usinagem para criar as amostras com as dimensões detalhadas na seção de métodos.

Os corpos de prova soldados e cortados foram encaminhados ao laboratório para inspeções técnicas, que englobaram ensaios de tração e dobramento.

No que diz respeito ao ensaio de tração, os resultados obtidos para os dois corpos de prova podem ser consultados na Tabela 3.

Tabela 3 - Resultados das análises dos ensaios de tração

Id. Lab	a_0	b_0	S_0	$F_{m\acute{a}x}$		Lr	Local de Ruptura
				/kgf	/kN		
TR-1	23,20	20,14	467,24	34479,20	338,12	724	Metal de solda
TR-2	23,28	20,11	468,15	34439,30	337,73	721	Metal de solda

Fonte: JPC Inspeções Técnicas

Tem-se a espessura média inicial (a_0) das amostras e a largura média inicial (b_0) das amostras, que são medidas em milímetros (mm). Essas medidas são parâmetros importantes, pois eles afetam a área média (s_0) de seção transversal das amostras durante o teste, medida em mm^2 . Quanto maior a espessura e a largura inicial, maior será a área de seção transversal, o que pode influenciar a força máxima ($F_{m\acute{a}x}$) que a amostra pode suportar antes de romper.

O limite de resistência (Lr) do material, medido em MegaPascals (MPa), é outro parâmetro fundamental. Ele representa a tensão máxima que o material pode suportar antes de romper. Em um ensaio de tração, a força máxima ($F_{m\acute{a}x}$) que a amostra pode suportar é diretamente relacionada ao Lr. Quanto maior o Lr do material, maior será a F_{max} .

Com base na análise dos dados apresentados na Tabela 3 e nas informações fornecidas na seção sobre materiais, pode-se inferir que a ruptura nas juntas soldadas ocorreu no metal de solda devido à sua resistência intrínseca ser menor que a do metal base. O consumível utilizado para a soldagem foi projetado para ter um limite de resistência de 540 MPa, enquanto o metal base possui um limite significativamente mais alto de 798 MPa. No entanto, a resistência das juntas de cada corpo de prova teve uma média de 723 MPa, que, embora superior à resistência do consumível, ainda é menor que a resistência do metal base.

Uma EPS previamente conduzida pela empresa tem seus resultados apresentados na Tabela 4. Nesse processo, empregou-se a técnica de soldagem GMAW para unir uma chapa de especificação ASTM A240 Gr. 304 solubilizado, que se refere a chapas de aço inoxidável de cromo e cromo-níquel, a uma chapa de especificação S690QL, com limites de resistência à tração de aproximadamente 515 MPa e 780 MPa, respectivamente. O consumível utilizado tem especificação AWS A5.9 - ER309 Lsi e possui cerca de 613 MPa de limite de resistência a tração. A soldagem foi realizada sob corrente do tipo CC+ e utilizou-se uma mistura de gás de proteção composta por 96% de Ar e 4% de CO₂.

Tabela 4 - Resultados de EPS anterior

Id. Lab	Dimensões (mm)	Área Seção (mm ²)	Carga (kgf)	Resist. (MPa)	Local de Ruptura
TR-1	19,46 x 25,19	490,20	31225	624,9	Rompeu fora da solda
TR-2	19,56 x 25,24	493,69	31331	622,6	Rompeu fora da solda

Fonte: Laboratório Metalográfico da Universidade de Itaúna

Os testes indicaram que a resistência à tração da junta alcançou valores de 624,9 MPa e 622,6 MPa em cada amostra testada. É importante destacar que a ruptura ocorreu no metal base do lado da chapa com menor resistência, especificamente na chapa A240 Gr. 304.

Essa observação esclarece por que a ruptura aconteceu na região do metal de solda nas amostras analisadas neste estudo. Como esta área apresentava uma resistência inferior em comparação ao metal base, ela se tornou o ponto mais fraco e vulnerável sob a tensão aplicada durante os testes.

Embora os resultados do teste de tração não tenham sido ideais, a empresa possui uma declaração de conformidade que valida o uso do arame E71T-1C. Segundo a norma AWS D1.1, a resistência mecânica do metal soldado deve ser superior à do metal base no teste de tração. No entanto, a declaração de conformidade

considera o resultado aceitável, já que as propriedades mecânicas do consumível soldado cumprem com as exigências do projeto.

Para as aplicações típicas de equipamentos com o tipo de junta analisada, tal diferença na resistência não representa uma preocupação crítica. Os componentes em questão, quando utilizados dentro das condições estabelecidas de um processo, não enfrentam tensões de tração próximas ao limite de resistência da junta. Além disso, o projeto dos equipamentos pode ser ajustado conforme necessário para acomodar as tensões esperadas sobre o material, podendo ser alterado o tipo de chapa e sua espessura. Portanto, a resistência registrada nas juntas é adequada, garantindo uma operação segura e eficiente, em que as juntas soldadas não são submetidas a tensões que possam comprometer sua integridade estrutural durante a vida útil esperada dos equipamentos.

Para o ensaio de dobramento, cada corpo de prova foi dobrado em um ângulo de severidade igual a 180°. A Tabela 5, fornecida pelo laboratório, está detalhada a seguir.

Tabela 5 - Resultados dos Ensaio de Dobramento

Item	Dimensões	Diâmetro Do Cutelo	Ângulo Do Dobramento	Observações
1	25,0 X 9,5 mm	50,8 mm	180°	Não houve descontinuidades
2	25,0 X 9,5 mm	50,8 mm	180°	Não houve descontinuidades
3	25,0 X 9,5 mm	50,8 mm	180°	Não houve descontinuidades
4	25,0 X 9,5 mm	50,8 mm	180°	Não houve descontinuidades

Fonte: JPC Inspeções Técnicas

As imagens que mostram os corpos de prova após o processo de dobramento que podem ser encontradas na Figura 15. Nestes tipos de testes, a análise visual desempenha um papel crucial na detecção de trincas e outras imperfeições. É notável a ausência de trincas ou fissuras, o que sugere que o material

é apropriado para aplicações que exigem deformação, desde que outras propriedades essenciais, como a resistência mecânica, sejam levadas em consideração.

Figura 15 – Chapas Após o Ensaio de Dobramento



Fonte: autoria própria.

Na Figura 16, é apresentado um procedimento semelhante, utilizando arame e chapas de especificações idênticas, mas sem a realização da limpeza de raiz. Observa-se a formação de uma trinca significativa e algumas trincas menores na região da solda.

A formação dessas trincas na segunda amostra ocorreu devido à ausência de limpeza de raiz, que resultou na presença de impurezas na junta. Essas impurezas afetaram a qualidade da solda, tornando a junta mais suscetível à formação de trincas, como evidenciado. Adicionalmente, as trincas podem também ter se formado devido a deformações não uniformes ou gradientes de temperatura durante o processo de soldagem, o que pode ter gerado tensões residuais.

É importante ressaltar a importância da limpeza de raiz, pois esse processo minimiza pontos de falhas de fusão, que resultam em áreas mais fracas na peça. Além disso, como não há proteção gasosa na parte inferior, essa região é mais suscetível à contaminação atmosférica. A limpeza de raiz remove essa parte contaminada, reduzindo o risco de trincas de hidrogênio na solda. Além disso, a limpeza de raiz é benéfica na questão das tensões residuais, contribuindo para uma junta soldada de maior qualidade e confiabilidade.

Figura 16 – Chapas com Processo de Soldagem sem Limpeza de Raiz e Junta Soldada com Trinca



Fonte: autoria própria.

A ausência de trincas indica uma elevada ductilidade do material, que se refere à habilidade do material de sofrer deformação plástica sem ruptura. Isso também implica que, caso o material tenha pontos de fragilização ou concentradores de tensão, como inclusões ou porosidades, estas não são críticas a ponto de provocar uma trinca sob as condições avaliadas.

5 CONCLUSÃO

Na criação de um projeto, a seleção do material é fundamental. É necessário compreender a resposta de cada material sob aplicação de força. Portanto, as resistências à tração previamente mencionadas servem como parâmetros fundamentais para a previsão de desempenho do conjunto, sempre levando em consideração as dimensões específicas de cada componente.

No caso das chapas usadas na pesquisa, a resistência à tração é de 798 MPa. Em contrapartida, o consumível utilizado tem uma resistência inferior, de 540 Mpa especificado pelo fabricante, enquanto a junta soldada apresenta uma resistência intermediária de 722,5 MPa. Esses valores nos dão uma visão clara de como cada componente se comporta.

Dentro da empresa, o entendimento é que os limites estabelecidos são adequados para atender às necessidades projetuais.

É importante observar que, mesmo considerando as resistências à tração estipuladas, podem existir áreas no material ou na solda que são mais vulneráveis. Por exemplo, apesar da chapa ter uma resistência de 798 MPa, a junta soldada tem 724 MPa. Isso nos mostra que há uma variação e que precisamos estar atentos a essas nuances que podem influenciar significativamente o desempenho final do conjunto.

Em um cenário onde um projeto é desenvolvido com a seleção do material de resistência à tração de 798 MPa, é imprescindível que a soldagem receba uma atenção especial. Afinal, a resistência da junta soldada, sendo de 724 MPa, deve ser o valor de referência considerado para garantir um projeto cujo produto seja capaz de suportar os esforços previstos, pois ultrapassar este limite compromete a integridade do produto final. Assim, para garantir a durabilidade e confiabilidade do projeto, é imperativo que ele seja projetado levando em consideração as características reais dos materiais e não exceda a menor resistência, que neste caso é de 724 MPa.

Dessa forma, ao finalizar a avaliação deste estudo, é evidente que a seleção e o entendimento dos materiais empregados em um projeto vão além dos valores nominais de resistência à tração fornecidos pelos fabricantes. A real performance de um conjunto está atrelada às menores resistências identificadas em seus componentes. Ter consciência destes detalhes, particularmente no contexto da

soldagem, é essencial para garantir que um projeto não apenas atenda, mas também supere as expectativas em termos de segurança e durabilidade. Ao respeitar esses limites e dar atenção às áreas vulneráveis, é possível entregar produtos robustos, duráveis e confiáveis, assegurando a satisfação e a segurança do cliente.

Apesar das observações feitas anteriormente, é essencial destacar que o arame E71T-1C utilizado na EPS foi meticulosamente escolhido para garantir uma solda de alta qualidade. Este arame, mesmo com as particularidades mencionadas, cumpre com rigor os padrões e requisitos estabelecidos, assegurando que a soldagem atenda aos requisitos de desempenho e confiabilidade exigidos pelos projetos desenvolvidos na empresa.

REFERÊNCIAS

- AMERICAN WELDING SOCIETY. **Standard Welding Terms and Definitions**. Miami: AWS, 2001.
- BOHNART, E. R. **Welding: principles and practices**. Nova Iorque: Mcgraw-Hill Education, 2018.
- CALLISTER, William D.; RETHWISCH, David G. **Ciência e Engenharia de Materiais - Uma Introdução**. 9. ed. Rio de Janeiro: LTC, 2016.
- MACHADO, Ivan Guerra. **Soldagem e técnicas conexas: processos**. Porto Alegre: [s.n.], 1996. Disponível em: <https://lume.ufrgs.br/bitstream/handle/10183/213243/001117701.pdf?sequence=1&isAllowed=y>. Acesso em: 29 mai. 2023.
- MARQUES, Paulo Villani; MODENESI, Paulo José; BRACARENSE, Alexandre Queiroz. **Soldagem: fundamentos e tecnologia**. 4. ed. Rio de Janeiro: Elsevier, 2017.
- MODENESI, Paulo José; MARQUES, Paulo Villani. **Introdução aos Processos de Soldagem**. Universidade Federal de Minas Gerais - Departamento de Engenharia Metalúrgica. Belo Horizonte, [s.n.], 2011. Disponível em: <https://demet.eng.ufmg.br/wp-content/uploads/2012/10/processo.pdf>. Acesso em: 1 jun. 2023.
- MODENESI, Paulo José; MARQUES, Paulo Villani; SANTOS, Dagoberto. **Introdução à Metalurgia da Soldagem**. Universidade Federal de Minas Gerais - Departamento de Engenharia Metalúrgica e de Materiais. Belo Horizonte, [s.n.], 2012. Disponível em: <https://demet.eng.ufmg.br/wp-content/uploads/2012/10/metalurgia.pdf>. Acesso em: 17 mai. 2023.
- THE JAMES F. LINCOLN ARC WELDING FOUNDATION. **The Procedure Handbook of Arc Welding**. 14. ed. Cleveland, Ohio: [s.n.], 2000.
- WAINER, Emilio; BRANDI, Sérgio Duarte; MELLO, Fabio Decourt Homem de. **Soldagem: processos e metalurgia**. São Paulo: Edgard Blücher, 2004.

**ANEXO A – MEDIÇÃO DOS PARÂMETROS DE SOLDAGEM - FCAW AWS D1.1
ED 2020**

Medição dos Parâmetros de Soldagem - Parte 1

Ca ma da	Pas se	Compri mento (cm)	Corre nte (i)	Ten são (V)	Tem po (min)	Tem po (seg)	VA. Solda gem (cm/mi n)	Heat Input (J/cm)	Nº de Voltas	Vel. Alimenta ção (m/min)
1	1	40	165	25	4	5	9,8	25.266	38	8,2
2	2	40	205	27	1	35	25,3	13.146	19	10,6
3	3	40	210	27	2	7	18,9	18.002	26	10,8
3	4	40	215	27	1	29	27	12.916	18	10,7
4	5	40	210	27	1	34	25,5	13.325	19	10,7
4	6	40	195	27	1	32	26,1	12.110	18	10,3
5	7	40	195	27	1	19	30,4	10.398	15	10
5	8	40	200	27	1	17	31,2	10.395	15	10,3
5	9	40	205	27	1	21	29,6	11.208	16	10,4
5	10	40	170	25	1	16	31,6	8.075	12	8,3
5	11	40	175	25	1	13	32,9	7.984	12	8,7
6	12	40	180	25	1	10	34,3	7.875	11	8,3
7	13	40	175	25	1	4	37,5	7.000	10	8,2
7	14	40	210	27	1	49	22	15.451	23	11,1

Fonte: Esco Weir

Medição dos Parâmetros de Soldagem - Parte 2

Corrente Min	Corrente Max	Tensão Min	Tensão Max	V(cm/min) Min	V(cm/min) Max	V(m/min) Max	Heat Input Max
149	182	23,3	26,8	7,3	12,2	9	25.266
185	226	25,1	28,9	18,9	31,6	11,6	13.146
189	231	25,1	28,9	14,2	23,6	11,9	18.002
194	237	25,1	28,9	20,2	33,7	11,7	12.916
189	231	25,1	28,9	19,1	31,9	11,7	13.325
176	215	25,1	28,9	19,6	32,6	11,4	12.110
176	215	25,1	28,9	22,8	38	11	10.398
180	220	25,1	28,9	23,4	39	11,3	10.395
185	226	25,1	28,9	22,2	37	11,5	11.208
153	187	23,3	26,8	23,7	39,5	9,2	8.075
158	193	23,3	26,8	24,7	41,1	9,5	7.984
162	198	23,3	26,8	25,7	42,9	9,1	7.875
158	193	23,3	26,8	28,1	46,9	9,1	7.000
189	231	25,1	28,9	16,5	27,5	12,3	15.451

Fonte: Esco Weir

ANEXO B – FICHA TÉCNICA DA CHAPA S690QL UTILIZADA



Data sheet 2006pt Strenx® 700 E/F 2019-05-13

Strenx® 700 E/F

Descrição geral do produto

O Strenx® 700 E/F é um aço estrutural que, dependendo de sua espessura, possui um limite de escoamento mínimo de 650-700 MPa.

O Strenx® 700 E/F atende os requisitos da EN 10025-6 para o grau S690 e suas espessuras. Algumas das aplicações típicas são estruturas com altas exigências quanto à sustentação de carga. O Strenx® 700 E (que encontra-se em conformidade com a S690QL) está disponível em chapas com espessuras de 4.0–160.0 mm, enquanto o Strenx® 700 F (que encontra-se em conformidade com a S690QL1) está disponível em chapas com espessuras de 4.0–130.0 mm.

Algumas das vantagens são:

- Superior capacidade de dobra e qualidade de superfície
- Soldabilidade com excelente resistência e tenacidade na ZTA
- Excelente consistência ao longo da chapa garantida por tolerâncias estreitas
- Alta resistência ao impacto, o que resulta em boa resistência a trincas

Faixa de dimensões

O Strenx® 700 E está disponível em chapas com espessuras de 4.0 a 160.0 mm e o Strenx® 700 F está disponível em chapas com espessuras de 4.0 a 130.0 mm. Dependendo da espessura, ambos os graus estão disponíveis em larguras de até 3350 mm e comprimentos de até 14630 mm. O programa de dimensões fornece informações mais detalhadas sobre as dimensões.

Propriedades mecânicas

Espessura (mm)	Força de escoamento R _{p0,2} (min MPa)	Resistência à tração R _m (MPa)	Alongamento A ₅ (min %)
4.0 - 53.0	700	780 - 930	14
53.1 - 100.0	650	780 - 930	14
100.1 - 160.0	650	710 - 900	14

Para corpos de prova transversais.

Propriedades de impacto

Produto	Energia mínima para o teste Charpy V transversal em corpos de prova de 10x10 mm ¹⁾	Atender aos requisitos para
Strenx® 700 E	69 J / -40 °C	S690QL
Strenx® 700 F	27 J / -60 °C	S690QL1

¹⁾ Salvo acordo em contrário, serão aplicados os testes de impacto transversal, de acordo com a norma EN 10025-6 opção 30. No caso de espessuras entre 6 - 11,9 mm, são utilizadas amostras em V Charpy de dimensão reduzida. O valor mínimo especificado é, nesse caso, proporcional à área de seção transversal da amostra, comparada a uma amostra de tamanho padrão (10x10 mm).

Composição química (análise de cadinho)

C ^{*)} (max %)	Si ^{*)} (max %)	Mn ^{*)} (max %)	P (max %)	S (max %)	Cr ^{*)} (max %)	Cu ^{*)} (max %)	Ni ^{*)} (max %)	Mo ^{*)} (max %)	B ^{*)} (max %)
0.20	0.60	1.60	0.020	0.010	0.80	0.30	2.0	0.70	0.005

Aço de grãos refinados. ^{*)} Elementos de liga intencionais.

Carbono equivalente CET(CEV)


	Espessura (mm)	4.0 - 5.0	5.1 - 30.0	30.1 - 60.0	60.1 - 100.0	100.1 - 130.0	130.1 - 160.0
Strenx® 700 E	Max CET(CEV)	0.34 (0.48)	0.32 (0.49)	0.36 (0.52)	0.39 (0.58)	0.41 (0.67)	0.43 (0.73)
Strenx® 700 F	Max CET(CEV)	0.38 (0.57)	0.38 (0.57)	0.39 (0.58)	0.39 (0.58)	0.41 (0.67)	–

$$CET = C + \frac{Mn + Mo}{10} + \frac{Cr + Cu}{20} + \frac{Ni}{40}$$

$$CEV = C + \frac{Mn}{6} + \frac{Cr + Mo + V}{5} + \frac{Cu + Ni}{15}$$

ANEXO C – FICHA TÉCNICA DO CONSUMÍVEL E71T-1C UTILIZADO

BÖHLER AWS E71T1-M/C

Classifications		Operating data		
EN ISO 17632-A	AWS A5.36	Welding positions	Polarity	Shielding gas
T 46 2 P C1 H5 T 46 2 P M21 1 H10	E71T1-C1A2-CS1-H8 E71T1-M21A2-CS1-H8		DC+	M21 C1

Typical chemical composition, all weld metal, wt. %

Shielding gas	C	Si	Mn
M21	0.04	0.50	1.40
C1	0.04	0.45	1.30

Mechanical properties, all weld metal (single values typical)

Shielding gas	Condition	Yield strength R _{p0.2%} MPa	Tensile strength R _m MPa	Elongation A (L ₀ =5d ₀) %	CVN Impact toughness ISO-V KV J	
					+20 °C	-20 °C
M21	As welded	530 (≥ 460)	600 (530 – 680)	28 (≥ 20)	130	100 (≥ 47)
C1	As welded	480 (≥ 460)	540 (530 – 680)	30 (≥ 20)	110	90 (≥ 47)

Steels to be welded

EN	ASTM
Steels up to a yield strength of 460 MPa (67 ksi) S235JR-S355JR, S235JO-S355JO, S450JO, S235J2-S355J2, S275N-S460N, S275M-S460M, P235GH-P355GH, P275NL1- P460NL1, P215NL, P265NL, P355N, P285NH-P460NH, P195TR1-P265TR1, P195TR2-P265TR2, P195GH-P265GH, L245NB-L415NB, L450QB, L245MB-L450MB, GE200-GE240, shipbuilding steels: A, B, D, E, A 32-E 36	A 106 Gr. A, B, C; A 181 Gr. 60, 70; A 283 Gr. A, C; A 285 Gr. A, B, C; A 350 Gr. LF1; A 414 Gr. A, B, C, D, E, F, G; A 501 Gr. B; A 513 Gr. 1018; A 516 Gr. 55, 60, 65, 70; A 573 Gr. 58, 65, 70; A 588 Gr. A, B; A 633 Gr. C, E; A 662 Gr. B; A 711 Gr. 1013; A 841 Gr. A; API 5 L Gr. B, X42, X52, X56, X60, X65

Approvals

TÜV, DB, DNV-GL, ABS, LR, CE

Overview diameters and packaging

Wire basket BS300		Black plastic spool S300	
Weight:	16 kg	Weight:	15 kg
Precision layer wound		Precision layer wound	
Dimensions		Dimensions	
ø external	300 mm	ø external	300 mm
ø Pinhole	52 mm	ø Pinhole	52 mm
Width	100 mm	Width	110 mm
Diameter	SAP code	Diameter	SAP code
1.2 mm	39319	1.2 mm	39322