

INSTITUTO FEDERAL DE SANTA CATARINA

FERNANDO RICARDO SASSO

OTIMIZAÇÃO DE PROCEDIMENTO DE SOLDAGEM PELA ALTERAÇÃO DO
MODO DE TRANSFÊRENCIA METÁLICA PARA SPRAY PULSADO

Xanxerê-SC

2023

FERNANDO RICARDO SASSO

OTIMIZAÇÃO DE PROCEDIMENTO DE SOLDAGEM PELA ALTERAÇÃO DO
MODO DE TRANSFÊRENCIA METÁLICA PARA SPRAY PULSADO

Monografia apresentada ao curso de engenharia mecânica do IFSC Xanxerê do Instituto Federal de Santa Catarina para a obtenção do diploma de engenheiro mecânico.

Orientador: Dr. Jeancarlos Araldi

Xanxerê
2023

S252o Sasso, Fernando Ricardo.
Otimização de procedimento de soldagem pela alteração do modo de transferência metálica para spray pulsado / Fernando Ricardo Sasso. — 2023.
52 p. : il., color.

Trabalho de conclusão de curso (graduação). Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia de Santa Catarina - Câmpus Xanxerê.
Orientação: Dr. Jeancarlos Araldi.
Inclui referências.


1. Arco spray pulsado. 2. Soldagem. 3. Otimização de processo. I. Araldi, Jeancarlos, Dr. II. Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia de Santa Catarina - Câmpus Xanxerê. III. Título.

Fernando Ricardo Sasso

OTIMIZAÇÃO DE PROCEDIMENTO DE SOLDAGEM PELA ALTERAÇÃO DO
MODO DE TRANSFÊRENCIA METÁLICA PARA SPRAY PULSADO

Este trabalho foi julgado adequado para obtenção do título em Engenharia Mecânica, pelo Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia de Santa Catarina, e aprovado na sua forma final pela comissão avaliadora abaixo indicada.


Xanxerê, 23 de novembro de 2023.

Documento assinado digitalmente
 JEANCARLOS ARALDI
Data: 12/12/2023 22:05:32-0300
Verifique em <https://validar.iti.gov.br>

Prof. Jeancarlos Araldi, Dr.


Orientador

Instituto Federal de Santa Catarina

Documento assinado digitalmente
 VANESSA MILHOMEM SCHMITT
Data: 14/12/2023 15:57:45-0300
Verifique em <https://validar.iti.gov.br>

Prof. Vanessa Milhomem Schmitt, Ma.

Instituto Federal de Santa Catarina

Documento assinado digitalmente
 FILIPE GOMES FAGUNDES
Data: 12/12/2023 20:50:22-0300
Verifique em <https://validar.iti.gov.br>

Prof. Filipe Gomes Fagundes, Me.

Universidade do Estado de Minas Gerais

"O sucesso é a soma de pequenos esforços repetidos dia após dia."

Robert Collier

AGRADECIMENTOS

Primeiramente gostaria de expressar minha gratidão à minha família - minha base e fonte constante de apoio. À minha mãe Solange e ao meu pai Idair, cujo amor incondicional e orientação sábia foram fundamentais em cada passo desta jornada. À minha irmã Franciele, a minha namorada Mariana, por ser minha fonte de inspiração e apoio inabalável. Sua compreensão e paciência foram essenciais para minha dedicação ao trabalho acadêmico. Agradeço também aos meus avós e tios, cujo apoio e carinho são tesouros inestimáveis na minha vida.

Estendo meus agradecimentos ao professor Jeancarlos Araldi, meu orientador e amigo, agradeço a orientação valiosa e apoio constante ao longo dessa jornada acadêmica. Às pessoas incríveis que foram parte ativa na construção deste TCC, como Éliton, Luan, Clivanei e demais colegas e servidores do IFSC, expresso meu reconhecimento pela colaboração e apoio inestimável.

A todos meus amigos e amigas, em especial aos colegas da faculdade, que compartilharam risos, desafios e conquistas. Agradeço por cada troca de experiências e aprendizado mútuo, tornando essa jornada acadêmica ainda mais enriquecedora. Cada um de vocês desempenhou um papel significativo, contribuindo para o meu crescimento pessoal e acadêmico. Este trabalho é uma celebração não apenas do meu esforço, mas também do apoio incrível que recebi. Obrigado por fazerem parte desta conquista.

RESUMO

Este estudo buscou otimizar o procedimento de soldagem de uma célula robotizada em uma empresa metalmecânica, por meio da comparação entre os tempos de processo utilizando os parâmetros para soldagem com transferência metálica por curto-circuito e os resultados obtidos através dos testes de soldagem por arco spray pulsado. Diante da escassez de trabalhadores nesse setor, a automação e o aumento da eficiência na soldagem tornam-se essenciais para as empresas. Nesse contexto, estudos que explorem tais alternativas são fundamentais para melhor utilização dos recursos disponíveis. A metodologia empregou ensaios de soldagem em amostras padronizadas, representativas dos produtos soldados no centro de trabalho robotizado e os resultados evidenciam uma redução expressiva no tempo de soldagem com o modo spray pulsado, indicando um aumento significativo na eficiência da célula robótica. A qualidade da junta soldada foi aprovada mediante análises visuais e ensaios não destrutivos, e as sugestões de melhoria foram feitas considerando seus impactos nos custos, qualidade e tempo, destacando o spray pulsado como uma alternativa vantajosa na soldagem robotizada. Este estudo contribui para a compreensão prática e otimização dos procedimentos de soldagem industrial, abrindo perspectivas para pesquisas futuras e avanços contínuos em busca de eficiência e qualidade.

Palavras-chave: Arco Spray Pulsado, Soldagem, Otimização de Processo.

ABSTRACT

This study aimed to optimize the welding process of a robotic cell in a metal-mechanical company by comparing the process times using parameters for welding with short-circuit metal transfer and the results obtained through tests of pulsed spray arc welding. The shortage of workers in this sector makes automation and increased efficiency in welding essential for companies. In this context, studies exploring such alternatives are crucial for the better utilization of available resources. The methodology employed welding tests on standardized samples representing products welded in the robotic workstation, and the results show a significant reduction in welding time with the pulsed spray mode, indicating a substantial increase in the efficiency of the robotic cell. The quality of the welded joint was approved through visual analysis and non-destructive tests, and improvement suggestions were made considering their impacts on costs, quality, and time, highlighting pulsed spray as an advantageous alternative in robotic welding. This study contributes to the practical understanding and optimization of industrial welding procedures, opening perspectives for future research and continuous advancements in pursuit of efficiency and quality.

Keywords: Pulsed Spray Arc, Welding, Process Optimization.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1: Primeira patente de arco elétrico	17
Figura 2: Transferência por curto-circuito.....	22
Figura 3: Ciclo completo de curto-circuito	23
Figura 4: Transferência do metal no modo spray	25
Figura 5: Diagrama esquemático de uma onda do tipo corrente pulsada e transferência do metal.....	26
Figura 6: Parâmetros utilizados para realização da soldagem da raiz	33
Figura 7: Corpo de prova	34
Figura 8: Robô de soldagem PANASONIC TM2000	36
Figura 9: Especificações técnicas do robô de soldagem PANASONIC TM2000.....	36
Figura 10: Parâmetros de soldagem do chanfro superior pelo modo de transferência spray pulsado	38
Figura 11: Parâmetros de soldagem do chanfro inferior pelo modo de transferência spray pulsado	38
Figura 12: Parâmetros de soldagem do chanfro superior pelo modo de transferência curto-circuito.....	39
Figura 13: Parâmetros de soldagem do chanfro inferior pelo modo de transferência curto-circuito.....	39
Figura 14: Relatório de conformidade	43
Figura 15: Relatório de conformidade	44
Figura 16: Análise visual de sessão do corpo de prova 1	45
Figura 17: Análise visual de sessão do corpo de prova 2	46
Figura 18: Análise metalográfica da seção do corpo de prova.....	47

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 – Classificação de transferência metálica	21
Tabela 2 – Classificação de transferência metálica avançada	22
Tabela 3 – Correntes de transição para transferência GMAW - Spray e GMAW-P ..	27
Tabela 4 – Parâmetros para soldagem por curto-circuito	32
Tabela 5 – Parâmetros para soldagem por spray pulsado	32
Tabela 6 – Principais propriedades mecânicas do aço ASTM A36	35
Tabela 7 – Composição do aço ASTM A36	35
Tabela 8 – Propriedades Mecânicas do arame sólido 1.2 ER70S-6	35
Tabela 9 – Composição química do arame sólido 1.2 ER70S-6	35
Tabela 10 – Tempos de soldagem	41
Tabela 11 – Tempos de soldagem	41
Tabela 12 – Tempos de soldagem	41
Tabela 13 – Tempos de soldagem	41
Tabela 14 – Custos em gás de proteção para soldagem de um metro de chanfro ...	48

SUMÁRIO

1. INTRODUÇÃO	13
1.1 Objetivos	16
1.1.1 Objetivo Geral	16
1.1.2 Objetivos específicos	16
2. DESENVOLVIMENTO	17
2.1 Soldagem por arco elétrico	17
2.1.1 Introdução ao arco elétrico	17
2.1.2 Fundamentos físicos do arco elétrico	18
2.2 Processo de soldagem com arame sólido sob proteção gasosa	18
2.2.1 Fontes de soldagem	18
2.2.2 Arames para soldagem	20
2.2.3 Gás de proteção e misturas para soldagem	20
2.2.4 Classificação na transferência metálica	21
2.2.4.1 Transferência por curto-circuito	22
2.2.4.2 Transferência globular	23
2.2.4.3 Transferência por spray	24
2.2.4.4 Transferência controlada por pulso	25
2.3 Soldagem por spray pulsado	26
2.3.1 Introdução à soldagem por arco spray pulsado	26
2.3.2 Definição dos parâmetros do processo de arco pulsado	27
2.3.3 Fonte de soldagem para arco pulsado	28
2.4 Ensaio de validação da junta soldada	28
2.4.1 Ensaio por líquido penetrante	29
2.4.2 Análise metalográfica	29
3. METODOLOGIA	31
3.1 Amplitude dos Parâmetros Utilizados	32
3.2 Procedimentos Experimentais	32
3.2.1 Especificações geométricas	33
3.2.2 Metal de base	34
3.2.3 Metal de adição	35
3.2.4 Gás de proteção	35
3.3 Equipamentos utilizados	36
3.3.1 Fonte de soldagem	37
3.3.2 Sistema automatizado de soldagem	37

3.3.3 Seleção final dos parâmetros.	37
3.3.4 Ensaio de Líquido Penetrante e Metalografia	40
4. RESULTADOS E DISCUSSÕES	41
5. CONCLUSÃO	49
5.1 Sugestão para trabalhos futuros	50
6. REFERÊNCIAS	51

1. INTRODUÇÃO

A soldagem é uma tecnologia que teve origem a mais de cinco mil anos, quando foram desenvolvidas as primeiras técnicas para realizar a junção de metais, teve papel fundamental no desenvolvimento do mundo como o conhecemos hoje e ainda se mantém relevante sendo o processo industrial mais utilizado para unir permanentemente componentes metálicos. É uma tecnologia amplamente relacionada à engenharia mecânica, provendo soluções para componentes e estruturas com viabilidade econômica e alto nível de segurança. Se faz presente nas mais diversas indústrias, em especial à automotiva, ferroviária e naval.

Uma das razões deste sucesso deve-se ao processo de soldagem com eletrodo consumível sob proteção gasosa, chamado em inglês de Gas Metal Arc Welding (GMAW). Segundo Villani (2016), a soldagem GMAW 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. A proteção do arco e da região da solda contra contaminação pela atmosfera é feita por um gás ou mistura de gases, que podem ser inertes ou ativos (VILLANI, 2016. p. 10).

Segundo Felizardo (2016), a escolha do gás gera mudanças diretamente nas características do arco, no modo de transferência de metal, na penetração, largura e no formato do cordão de solda.

Dentro desse mesmo processo existem diversas variáveis que podem ser alteradas e combinadas, gerando impactos diretos no resultado da soldagem, podendo vir a otimizar o processo produtivo por meio de melhorias contínuas, sejam elas nos custos de produção, velocidade do processo ou na qualidade da junta soldada.

A operação de soldagem envolve um grande número de aspectos que podem ter algum impacto em seu custo final como o uso de consumíveis (metal de adição, gás, fluxo e outros), o custo de pessoal e outros custos fixos, o gasto de energia elétrica, os custos de manutenção e a depreciação dos equipamentos e o custo dos equipamentos e materiais de proteção, de peças, ferramentas e outros materiais (MODENESI, 2012. P. 1).

A transferência do metal de adição na soldagem se dá pelo transporte de gotas fundidas da ponta do eletrodo consumível até a poça de fusão, já o modo de

transferência é determinado por parâmetros do processo e afeta diversas características da solda.

Existem quatro modos de transferência metálica, são eles, transferência por curto-circuito, globular, *spray* e controlada.

No curto-circuito, a corrente e a tensão utilizadas são baixas, e o eletrodo é transferido para a poça de fusão, apenas no período que está em contato com a mesma e nenhum metal é transferido pelo arco. Nesse modo, a poça de fusão é pequena e resfria rapidamente, mas o nível de respingos é bastante elevado.

Para a transferência globular, a corrente e a tensão são intermediárias, e exige um ajuste mais refinado desses parâmetros, para que o eletrodo e a poça de fusão não entrem em contato gerando um curto-circuito e respingos. A deposição do material na poça de fusão agora se dá pela ação da gravidade, à medida que o eletrodo aquece, gera uma gota maior que o diâmetro do eletrodo, se separando do mesmo e caindo na poça de fusão. O nível de respingos deste modo é consideravelmente menor que no curto-circuito, mas ainda é elevado.

O modo de transferência por *spray* ocorre com uma alta velocidade de alimentação do arame e com uma alta tensão. A transferência do metal ocorre sem formação de curtos-circuitos, com gotas muito menores do que o diâmetro do arame. Os diagramas da tensão e correntes são muito estáveis neste processo. Por causa da alta energia no processo, o arco *spray* é mais aplicável para soldagem de chapas grossas e nas posições plana e horizontal (FISCHER *apud* JEFFUS, 2002).

Fischer caracteriza o modo de transferência pulsado pela oscilação entre uma corrente baixa, chamada corrente de base, e uma corrente alta, chamada corrente de pico ou corrente de pulso. Onde após a ignição, o arco fica sempre aberto, sem formação de curtos-circuitos. Durante a baixa corrente, o arco se mantém aberto e aquece o eletrodo, quando a corrente aumenta, o metal do eletrodo é fundido, e se junta a poça de fusão, de modo globular ou *spray*.

Para atender às altas exigências de qualidade, produtividade, custo de fabricação, segurança do trabalho e adequado funcionamento das peças, a soldagem está se tornando cada vez mais mecanizada e automatizada (FISCHER *apud* MATTHES 2003).

Outro fator relevante para o crescimento da automatização na área se dá pela carência de soldadores qualificados no mercado de trabalho. De acordo com uma pesquisa realizada pela *American Welding Society (AWS)*, até 2023, 375000 vagas para soldadores não serão preenchidas nos Estados Unidos.

Essa tendência é sentida também no Brasil, de acordo com a Confederação Nacional da Indústria (CNI), levantamentos apontam que cinco em cada dez empresas do setor relatam a falta de mão de obra apropriada, sendo soldadores parte desta estatística.

Segundo Fischer (2011), para utilizar as vantagens da automação no processo de soldagem, soldando com alta qualidade e de forma contínua, se faz necessário um profundo conhecimento dos fundamentos da tecnologia, como por exemplo, dos efeitos da transferência do metal. Ressaltando que a seleção cuidadosa dos parâmetros é fundamental para a segurança do processo de produção e para a redução dos custos gerados pelo retrabalho das peças. Tem-se como exemplos de fatores importantes para a reprodutibilidade do processo MIG/MAG automatizado, as fontes de soldagem e a possibilidade da alteração dos parâmetros do processo pelas fontes.

Impulsionada pela modernização das máquinas de soldagem que passaram a ser eletrônicas, quase todos os fornecedores de fontes de soldagem desenvolveram novas tecnologias para controle da transferência de metal no processo GMAW, um desses processos é conhecido como transferência por corrente pulsada ou então arco pulsado.

A otimização do modo de transferência metálica no processo de soldagem, especificamente a transição para GMAW Spray Pulsado, pode resultar em ganhos substanciais de produtividade para empresas do setor metalmeccânico. No entanto, há uma lacuna na literatura em relação à comparação entre os parâmetros convencionais de soldagem e aqueles associados ao processo de soldagem com transferência metálica pelo modo GMAW Spray Pulsado. Esta ausência de comparação abrange uma variedade de aspectos, incluindo tempos de processo, qualidade das soldas e custos envolvidos. Este estudo visa preencher essa lacuna, proporcionando uma análise desses fatores, com o objetivo de contribuir para a compreensão e otimização dos procedimentos de soldagem em contextos industriais específicos.

1.1 Objetivos

1.1.1 Objetivo Geral

Otimizar o procedimento de soldagem de uma célula robotizada de uma empresa metal mecânica comparando o tempo de processo utilizando os parâmetros atuais de soldagem por curto-circuito, com os resultados obtidos a partir dos testes da soldagem por arco spray pulsado.

1.1.2 Objetivos específicos

A. Garantir a aprovação da junta soldada pela garantia da qualidade, por meio de análise com ensaio por líquido penetrante buscando descontinuidades superficiais.

B. Analisar a qualidade e penetração da solda por meio de ensaios visuais em seções do corpo de prova.

C. Realizar análise metalográfica para observar a microestrutura da junta soldada e da zona termicamente afetada.

D. Sugerir melhoria no procedimento de soldagem atual, alterando os parâmetros e consumíveis necessários para obtenção do melhor processo possível, analisando custos, qualidade e tempo de processo.

2. DESENVOLVIMENTO

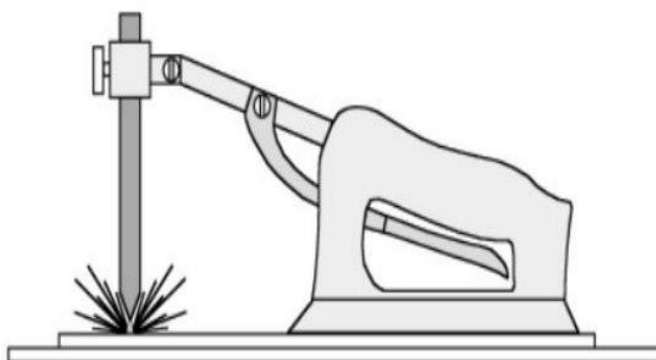
2.1 Soldagem por arco elétrico

Nos subcapítulos a seguir serão apresentados uma introdução aos fundamentos do arco elétrico e aos processos de soldagem com arame sólido sob proteção gasosa e seus modos de transferência metálica.

2.1.1 Introdução ao arco elétrico

Embora os primeiros registros de soldagem datem de mais de 5 mil anos, o processo como o conhecemos hoje é recente, com menos de 150 anos de aplicação. As técnicas modernas de soldagem se desenvolveram a partir do descobrimento do arco elétrico por Sir Humphrey Davy (1801-1806). Utilizado primeiro como fonte de luz, somente em 1885, na Inglaterra, foi registrada a primeira patente por Nikolas Bernados e Stanislav Alexander para uso do arco elétrico em processo de união de materiais metálicos, baseada em um arco elétrico estabelecido entre um eletrodo de carvão e a peça a ser soldada. Este processo é ilustrado na Figura 1.

Figura 1: Primeira patente de arco elétrico



Fonte: Modenesi (2012).

Segundo Modenesi (2012), o arco elétrico é a fonte de calor utilizada na soldagem por fusão de materiais metálicos, apresentando uma combinação boa de características que incluem uma concentração adequada de energia para a fusão localizada do metal de base, facilidade de controle, redução de custo relativo do equipamento e um nível regular de riscos à saúde dos seus operadores.

2.1.2 Fundamentos físicos do arco elétrico

De acordo com Guile (1984), um arco elétrico é uma forma especial de descarga de eletricidade entre dois eletrodos sustentados por meio de um gás ou vapor ionizado em temperaturas elevadas. O eletrodo com polo positivo se chama ânodo e o eletrodo com polo negativo se chama cátodo. No processo de soldagem então, o arco elétrico é responsável por fundir o eletrodo e gerar a poça de fusão, sua forma é geralmente cônica e voltada para a peça a ser soldada, pois a área da mesma é muito maior que a do eletrodo.

Para Modenesi (2012), o arco elétrico pode ser considerado um condutor semelhante a um cabo de energia, contudo, pelo fato de ser um condutor gasoso e não sólido, este torna-se muito mais sensível as forças atuantes sobre ele. Para os diferentes modos de transferência metálica, os impactos do campo magnético do arco variam, mas precisam sempre ser levados em consideração para um melhor entendimento do comportamento do arco elétrico na soldagem.

2.2 Processo de soldagem com arame sólido sob proteção gasosa

A soldagem com arame sólido sob proteção gasosa ou, em inglês *Gas Metal Arc Welding* (GMAW), é o nome utilizado para descrever o processo em que um arco elétrico é estabelecido por meio de um gás ionizado, entre um eletrodo consumível alimentado continuamente, conhecido como metal de adição, e uma peça de trabalho, conhecida como metal de base (FISCHER, 2011. P. 30).

Ainda de acordo com Fischer (2011), os principais equipamentos do processo, são compostos por uma máquina de soldagem, o alimentador do arame, a tocha de soldagem e pelos cilindros de gás de proteção. Dependendo do metal de base, são usados gases inertes (MIG - Metal Inert Gas), ou gases ativos (MAG – Metal Active Gas).

2.2.1 Fontes de soldagem

No processo de soldagem por fusão, a fonte é a responsável pela transferência de energia para o arco elétrico, causando o aquecimento do material adjacente até a sua fusão. Entretanto, levando em consideração a elevada taxa de transferência de calor nos metais, e o rápido resfriamento da poça de fusão, Modenesi (2012) ressalta que é fundamental que as fontes forneçam energia a uma taxa

suficiente para gerar a fusão localizada antes que o calor se difunda de forma considerável para o restante da peça. Para garantir isso, existe uma variável chamada de potência específica, ou intensidade de uma fonte de soldagem, que pode ser calculada de acordo com a Equação 1.

$$P_{esp} = \frac{\eta UI}{A\sigma} \left[\frac{W}{m^2} \right] \quad \text{Equação (1)}$$

Onde:

P_{esp} = Potência específica;

η = Rendimento térmico da fonte;

U = Tensão de soldagem;

I = Peça Corrente de soldagem;

$A\sigma$ = Área de contato entre a fonte e a peça;

$\frac{W}{m^2}$ = Indica a unidade de watt por metro quadrado.

Corroborando com Modenesi (2012), sobre as fontes de soldagem Villani (1991), sugere que estas devem atender a pelo menos três requisitos básicos que seriam, garantir a geração de corrente e tensão adequadas para um ou mais processos de soldagem, permitir o ajuste desses parâmetros para aplicações específicas e controlar, durante a soldagem, esses valores de tensão e corrente de acordo com o que pede o processo.

Pode-se separar as fontes em duas classes: máquinas convencionais e máquinas eletrônicas. No Brasil, segundo Villani (1991), a grande maioria das fontes utilizadas ainda são convencionais. Já em países do primeiro mundo como Japão e Estados Unidos, além de boa parte da Europa, a maior parte das fontes de soldagem fabricadas para arco elétrico são eletrônicas. O que melhor define as fontes eletrônicas é o uso de dispositivos semicondutores para controle direto da tensão e/ou corrente de saída da máquina, enquanto nas máquinas convencionais, esse controle é essencialmente mecânico.

Para a soldagem a arco pulsado, as máquinas eletrônicas (Fontes transistorizadas) são as mais aplicadas. As máquinas de soldagem eletrônicas usam módulos eletrônicos para "criar" os parâmetros de soldagem. As características da fonte da energia são definidas pelo controlador dos módulos e não pelos componentes de energia. Nas máquinas eletrônicas, a regulagem previamente ajustada realiza a variação dos parâmetros e conseqüentemente os processos térmicos no arco e, em especial, a transferência metálica. Esta tecnologia possibilita a aplicação das fontes nos diversos processos de soldagem a arco elétrico e, por causa disto, estas fontes também são chamadas de fontes multiprocessos (FISCHER, 2011).

2.2.2 Arames para soldagem

“Os arames para soldagem são constituídos de metais ou ligas metálicas que possuem composição química, dureza, condições superficiais e dimensões bem controladas” (VILLANI, 1991).

Ainda de acordo com o autor, arames de baixa qualidade podem produzir falhas de alimentação, instabilidade no arco e descontinuidades no cordão de solda.

Para a soldagem GMAW, os arames são geralmente cobreados, dessa forma se evita a oxidação do arame, e também se melhora o contato com o bico de soldagem. Esses arames também podem ser divididos em duas categorias, sólidos ou tubulares, sendo que os sólidos possuem seção inteiramente metálicas, enquanto os tubulares possuem um enchimento interno, que se assemelha ao eletrodo revestido.

2.2.3 Gás de proteção e misturas para soldagem

Os gases de proteção exercem diversos benefícios importantes para o processo de soldagem, e são responsáveis diretos na função de manter o oxigênio e nitrogênio da atmosfera longe da poça de fusão, e cada tipo de processo tem um gás recomendado.

Segundo Villani Paulo (1991):

Os gases utilizados na soldagem GMAW, podem ser inertes ou ativos ou, ainda, misturas destes. O tipo de gás influencia as características do arco e a transferência de metal, a penetração, a largura e o formato do cordão de solda, a velocidade máxima de soldagem, a tendência ao aparecimento de mordeduras e o custo da operação.

Dentre os gases mais utilizados para a soldagem GMAW, se destacam o Argônio, o Hélio, o Dióxido de Carbono, e outras misturas destes gases.

2.2.4 Classificação na transferência metálica

A transferência do metal de adição para a soldagem, corresponde a maneira pela qual as gotas fundidas do eletrodo, se movem até a poça de fusão. As características desse transporte influenciam em diversos aspectos do processo, mas principalmente na forma do cordão, na formação de respingos e na estabilidade e desempenho do arco elétrico.

O tipo da transferência do metal é determinado pelos vários parâmetros do processo como a corrente e a tensão do arco, a característica do metal de adição, a polaridade, o gás de proteção e o comprimento do arco (SMITH, 1966). A primeira classificação da transferência do metal no processo de soldagem ao arco elétrico foi apresentada 1976 por Anon na comissão XII do Instituto Internacional de Soldagem.

De acordo com Modenesi (2012), as principais forças que atuam na ponta de um eletrodo são a gravidade, a tensão superficial, a força eletromagnética, a força de arraste dos gases e a força de reação à jatos de vapores ou ao jato de plasma.

Os desenvolvimentos, nas últimas três décadas, do controle de fontes de soldagem do processo GMAW possibilitaram um controle da transferência do metal mais preciso e causaram uma revisão da classificação. A Tabela 1 e a Tabela 2 apresentam a classificação da transferência do metal de acordo com a classificação por Norrish (2009) e Lucas (2005).

Tabela 1: Classificação de transferência metálica

Tipo de transferência		Aplicação	Nome comercial
1	Aerossol controlado	Arco Pulsado	GMAW com frequência de pulso variável
2	Curto-Circuito Controlado	Curto-Circuito controlado pela corrente	GMAW com corrente controlada
		Curto-Circuito controlado pela alimentação do arame	GMAW com orientação do arame oscilando

Fonte: Adaptado de Norrish (2009).

Tabela 2: Classificação de transferência metálica avançada

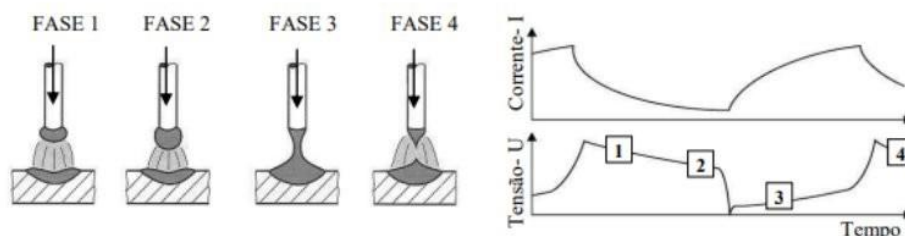
Tipo de transferência		Aplicação	Nome comercial
1	Curto-circuito	"stickout" prolongado	Alta taxa de deposição com curto-circuito
		Pulsado de baixa frequência	Preencher uma fresta com pulsação da corrente principal
2	Transferência pulsada	Multi-fio	Soldagem multi-fio
		Pulsado de baixa frequência	Soldagem de alumínio com transferência pulsada modificado
		Polaridade variável	Soldagem chapas finas e passe de raiz com acesso de um lado só
3	Transferência aerossol	Rotacional (Rotating)	Corrente elevada com "stickout" prolongado
		Eletrodo negativo	Guiada por parede de fluxo ou misturas de gases especiais
		"stickout" prolongado	Soldagem de aço com alta taxa de deposição
		Polaridade variável	Soldagem de passe de raiz (tubos)

Fonte: Adaptado de Lucas (2005).

De um modo geral, de acordo com Lucas (2005), é possível classificar a transferência de metal de adição no processo GMAW em curto-circuito, transferência pulsada e transferência aerossol (spray).

2.2.4.1 Transferência por curto-circuito

Segundo Fischer (2011), na soldagem com transferência por curto-circuito, são aplicados pequenos comprimentos de arco e baixa corrente, a poça de fusão característica desse modo é pequena, e a solidificação ocorre rapidamente. Neste modo, "o metal é transferido do eletrodo para a peça de trabalho quando o eletrodo entra em contato com a poça de fusão através de uma ponte de metal líquido." FISCHER 2011. A Figura 2 ilustra essa transferência.

Figura 2: Transferência por curto-circuito

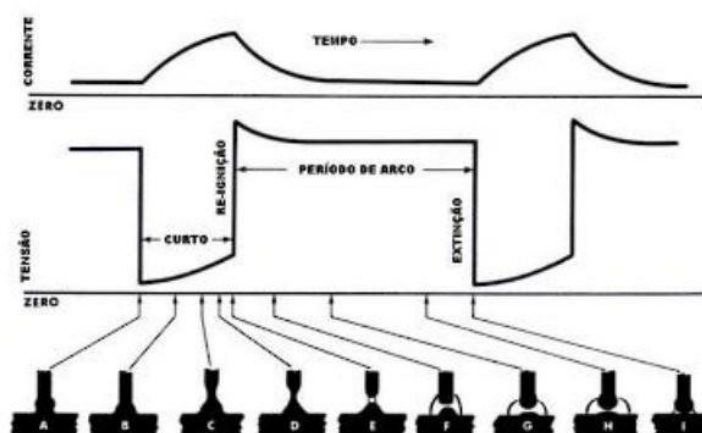
Fonte: Fischer *apud* Soderstrom (2008).

Por conta dos baixos valores agregados para tensão e corrente do arco, a soldagem por curto-circuito se torna uma ótima alternativa para chapas finas, ou

quando a peça a ser soldada exija uma distorção mínima em seus parâmetros dimensionais (FISCHER, 2011).

O metal é transferido do arame à poça de fusão apenas quando há contato entre os dois, ou a cada curto-circuito. O arame entra em curto-circuito com a peça de 20 a 200 vezes por segundo. A Figura 3 ilustra um ciclo completo de curto-circuito. Quando o arame toca a poça de fusão (A), a corrente começa a aumentar para uma corrente de curto-circuito. Quando esse valor alto de corrente é atingido, o metal é transferido. O arco é então reaberto. Como o arame está sendo alimentado mais rapidamente que o arco consegue fundi-lo, o arco será eventualmente extinguido por outro curto (I). O ciclo recomeça. Não há metal transferido durante o período de arco aberto, somente nos curtos-circuitos.

Figura 3: Ciclo completo de curto-circuito



Fonte: ESAB (2005).

Por esse modo de transferência, apesar de útil em diversas situações, se não seguido de alguma forma de controle, tem como fator negativo a baixa produtividade, devido sua baixa deposição de material proveniente das baixas correntes adotadas, e gera um grande número de respingos, podendo ser prejudicial às áreas superficiais adjacentes a soldagem.

2.2.4.2 Transferência globular

Esse modo de transferência metálica ocorre com a combinação de tensões medianas ou elevadas, com corrente baixas, dessa forma, se garante um arco longo

o suficiente para prevenir o curto-circuito, mas com forças eletromagnéticas não tão influentes na deposição do material.

Segundo Scotti (2008), esse processo se caracteriza pela transferência irregular de gotas grandes, maiores que o eletrodo, em uma frequência de deposição muito baixa, que geralmente varia entre 1 e 10 gotas por segundo.

Ainda segundo Scotti (2008), as características da gota, e a frequência de transferência, são influenciadas principalmente pelo diâmetro e composição do arame, do gás de proteção e da força de corrente de soldagem.

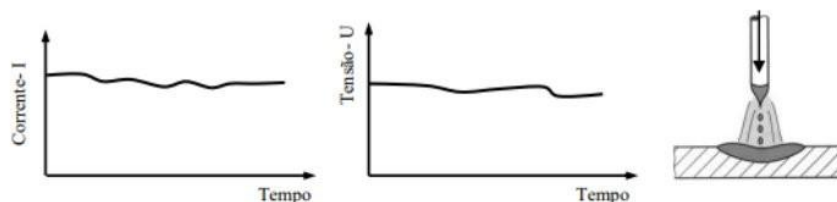
Durante o crescimento da gota, ela permanece no eletrodo devido à ação combinada de forças de tensão superficial e de vaporização, mas conforme ela ganha massa, seu peso e a força de arraste (apesar de outras forças agirem de forma reduzida) geram o destacamento. Pelo destacamento ocorrer principalmente pela ação da gravidade, a posição de soldagem deve ser plana, pois quando realizada em posição vertical, gotas podem desabar sem acompanhar o arco. Esses impedimentos, porém, podem ser ajustados utilizando um modo controlado de transferência, que será abordado futuramente (SCOTTI, 2008).

Este modo gera uma taxa moderada de respingos, muito inferior a transferência por curto-circuito, mas devido à baixa corrente utilizada na soldagem, a taxa de deposição de metal é também reduzida, diminuindo a capacidade produtiva.

2.2.4.3 Transferência por spray

De acordo com Wainer (1992), este tipo de transferência acontece em elevadas taxas de corrente, utilizando como gás de proteção o argônio (Ar) ou com misturas, onde ele se encontra geralmente em maiores quantidades, acima de 85%. A gota de metal fundido formada na ponta do arame, possui diâmetro consideravelmente menor que o mesmo. Uma grande quantidade de calor é aplicada, e por esse motivo é indicado para a soldagem de chapas mais grossas, nas posições plana e horizontal. A figura 4 representa esquematicamente este modo de transferência:

Figura 4: Transferência do metal no modo spray



Fonte: Fischer *apud* Hermans (1999).

De acordo com Marques (2009), as forças eletromagnéticas atuantes sobre este processo, sobrepõem a ação da gravidade, o que possibilitaria em tese realizar a soldagem em todas as posições, não fossem as altas temperaturas na poça de fusão.

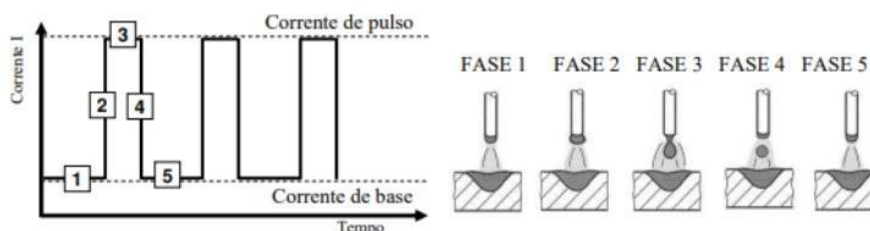
Corroborando com a citação acima mencionada por Wainer (2009), Jeffus *et al* (2002), ressalta que “Por causa da alta energia no processo, o arco *spray* é mais aplicável para soldagem de chapas grossas e nas posições plana e horizontal”.

2.2.4.4 Transferência controlada por pulso.

O modo de transferência pulsado é obtido pela oscilação entre uma corrente baixa (corrente de base), e uma corrente alta (corrente de pico ou corrente de pulso). Seu objetivo primário é conseguir transferir em uma situação ideal, com cada pulso da corrente, uma gota de metal fundido do eletrodo para a poça de fusão (FISCHER, 2011. P. 43).

Busca-se atingir um alto nível de energia na faixa de corrente de pico para transferência do metal por spray e um nível de baixa energia como corrente de base, para melhor estabilidade durante o processo provocando uma transferência controlada e sem respingos. A soldagem por arco pulsado possibilita também a utilização de arames de maior diâmetro do que o comum para chapas finas do que a transferência convencional (MICALLI, 2002. P. 361). Na Figura 5, podemos observar o comportamento desse modo de transferência.

Figura 5: Diagrama esquemático de uma onda do tipo corrente pulsada e transferência do metal



Fonte: Ruckdeschel (1970).

2.3 Soldagem por spray pulsado.

A seguir apresenta-se a introdução à soldagem por arco spray pulsado e a definição dos parâmetros do processo de arco pulsado.

2.3.1 Introdução à soldagem por arco spray pulsado.

De acordo com Wainer (1992), o arco pulsado é semelhante ao arco spray, porém o que os diferem é que neste, as gotas são transferidas por pulsos. Este método de transferência pode ser utilizado para a soldagem em todas as posições.

Segundo Micalli (2002), em um processo de transferência por spray pulsado, a fonte de energia controla os pulsos do processo, a corrente de pico realiza a transferência por arco spray enquanto corrente de base é fixa em um nível mínimo com o objetivo de manter o arco aberto, mas a corrente é tão baixa, a ponto de não provocar nenhuma transferência de metal para a poça de fusão.

Como não há transferência de metal durante a corrente de base, a poça de solda tem uma chance de esfriar rapidamente. Isto é bem distinto em comparação com a transferência spray, onde o metal fundido é transferido continuamente.

Esta poça de solda rapidamente resfriada, é o que permite o uso da transferência spray pulsada para espessuras finas, e para melhor controle em trabalhos fora de posição. Em muitos casos a transferência GMAW-P permite também maiores e mais variados tamanhos de bitolas de arame. A Tabela 3 compara correntes mínimas para transferência spray e transferência spray pulsada. Note que os valores baixam para transferência spray pulsada. Isto se dá pelo menor aporte de calor. A transferência a arco pulsado também permite soldar materiais finos com uma distorção mínima (MICALLI, 2002).

Na Tabela 3, podemos observar as correntes de transição para transferência spray, e transferência spray pulsada.

Tabela 3: Correntes de transição para transferência GMAW - Spray e GMAW-P

Tipo de material	Diâmetro do Arame		Gás de proteção	Corrente mínima para Spray	Média de corrente Spray Pulsada
Aço Carbono	.035 in	0.9 mm	98% Argônio – 2% Oxigênio	165	48
Aço Carbono	.045 in	1.1 mm	98% Argônio – 2% Oxigênio	220	68
Aço Inox	.035 in	0.9 mm	99% Argônio – 1% Oxigênio	170	57
Aço Inox	.045 in	1.1 mm	99% Argônio – 1% Oxigênio	225	104
Alumínio	.047 in	1.2 mm	100% Argônio	135	44
Alumínio	.062 in	1.6 mm	100% Argônio	180	84
Bronze Silício	.035 in	0.9 mm	100% Argônio	165	107
Bronze Silício	.045 in	1.1 mm	100% Argônio	205	133

Fonte: Adaptado de Micalli (2002).

2.3.2 Definição dos parâmetros do processo de arco pulsado.

Conforme Fischer (2011), a regulação da corrente e tensão de soldagem com arco pulsado é caracterizada por um grande número de parâmetros, que, em fontes modernas de regulação podem ultrapassar 40 variáveis.

Os parâmetros segundo o autor Fischer (2011) mais influentes que caracterizam o processo arco pulsado são apresentados a seguir:

-Corrente de pulso - IP [A] ou tensão de pulso - UP [V]: é o valor máximo da corrente e tensão no processo. A corrente é a responsável pelo estrangulamento da gota e sua transferência para a poça de fusão, e seu valor precisa estar acima da corrente de transição, de forma a promover o destacamento de uma gota. O nível depende do material, diâmetro do eletrodo e gás de proteção.

-Corrente de base - IB [A] ou tensão de base - UB [V]: o valor mínimo da corrente e tensão que alimenta o arco elétrico garantindo que este fique aberto. A corrente de base não é suficiente para provocar a transferência do metal.

-Tempo de pulso tP [ms]: é definido desde o início do pulso até a descida da corrente ou tensão.

-Tempo de base tB [ms]: tempo entre os pulsos

-Período da sequência T [ms]: tempo de um ciclo do pulso é definida como o período de início de um pulso para o final do tempo de base.

-Frequência de pulsação/ pulso f [Hz]: é o número de pulsos de corrente de pico, que ocorrem em um segundo e é dado pelo inverso do tempo de ciclo.

-Tempo de subida tBP [ms]: tempo até a corrente chegar ao valor máximo.

-Tempo de descida tPB [ms]: o tempo até a corrente descer para o valor de base.

-Velocidade da alimentação VA [m/min]: define a quantidade de arame alimentado por tempo. Tem influência significativa na transferência do metal e na taxa de fusão e de deposição.

-Velocidade de Soldagem VS [m/min]: é a velocidade com que o arco é deslocado ao longo da junta. Tem influência na geometria do cordão e controla a quantidade de calor que é fornecida ao longo da junta, que pode ser calculada por meio da equação 2

$$Es = \frac{U \times I}{Vs} \quad \text{Equação (2)}$$

Onde:

Es = Aporte térmico;

U = Tensão de soldagem;

I = Corrente de soldagem;

Vs = Velocidade de soldagem;

2.3.3 Fonte de soldagem para arco pulsado

Para Fischer (2011), a escolha da fonte de soldagem é um aspecto crucial no estudo dos parâmetros de soldagem. Para investigar a influência desses parâmetros, é necessário utilizar uma fonte que ofereça a flexibilidade de ajustar todos os parâmetros do processo. O nível de liberdade para ajustar esses parâmetros desempenha um papel significativo na capacidade de testar e compreender suas influências.

No entanto, uma máquina de soldagem com tecnologia de arco pulsado convencional não permite uma variação livre de todas as essas variáveis. Os fornecedores não disponibilizam acesso ao sistema de programação dos parâmetros devido ao grande número de parâmetros e à complexa interação entre eles, o que exigiria um conhecimento especializado do soldador (FISCHER. 2011). Além disso, uma programação incorreta poderia resultar em danos aos componentes eletrônicos.

2.4 Ensaios de validação da junta soldada

Nos desafios da engenharia e metalurgia, a garantia da qualidade e a compreensão profunda dos materiais desempenham papéis cruciais. Este capítulo apresenta os fundamentos de dois métodos essenciais de avaliação: o ensaio por

líquido penetrante e o ensaio metalográfico. Ambos desempenham papéis distintos, mas igualmente vitais, na busca por uma compreensão abrangente da integridade estrutural e da microestrutura de materiais diversos.

2.4.1 Ensaio por líquido penetrante

A finalidade do ensaio por líquido penetrante é detectar descontinuidades superficiais e que sejam abertas na superfície, como trincas, poros, entre outros. O ensaio é aplicável em todos os materiais sólidos, que não sejam porosos e não possuam superfície muito grosseiras (ANDREUCCI,2014). Este método sensível e eficaz oferece uma abordagem valiosa na detecção de trincas e fissuras, contribuindo para a identificação precoce de potenciais pontos de falha em materiais metálicos.

De acordo com Andreucci (2014), o método baseia-se em seis etapas. Primeiramente é realizado uma limpeza da superfície, onde não devem existir água, óleo ou outro contaminante, em seguida, aplica-se um líquido chamado de penetrante, geralmente de cor avermelhada, formando um filme sobre a superfície, fazendo com que ele penetre na descontinuidade (ANDREUCCI, 2014). Após um certo tempo de aplicação do líquido, faz-se a remoção do excesso de penetrante da superfície. Na sequência, ocorre a aplicação de um filme uniforme de revelador sobre a superfície, sendo comum um pó branco que atua absorvendo o penetrante das descontinuidades e revelando-as. As etapas finais consistem na análise das manchas e na limpeza da peça de estudo.

2.4.2 Análise metalográfica

O ensaio metalográfico, embora intrusivo, oferece uma visão sem igual da microestrutura dos materiais. Ao atravessar o processo de preparação de amostras, desde cortes meticulosos até a aplicação de ataques químicos, este ensaio destrutivo proporciona uma análise minuciosa das fases, grãos e inclusões presentes nos materiais.

Durante o processo de preparação da amostra, esta é cortada, montada, lixada, polida e, por vezes, atacada quimicamente para revelar as características microestruturais. Como parte dessas etapas, a amostra é alterada de alguma forma, tornando o ensaio destrutivo. (Senai, 1997).

O lixamento deve ser executado por meio de uma série de lixas com granulações decrescentes, e após, polir a peça com panos encharcados em uma solução a base de Alumina ou pasta de diamante, Em seguida é realizado um ataque químico por imersão ou aplicação, sendo aplicado principalmente soluções com ácido nítrico em concentrações que variam de 2 a 5%.

3. METODOLOGIA

Neste capítulo do trabalho, será apresentado a metodologia utilizada no desenvolvimento deste projeto. Quanto à forma de abordagem do problema, trata-se de uma pesquisa aplicada qualitativa e quantitativa.

Para Michel (2015), a pesquisa qualitativa adquire e examina dados descritivos, adquiridos por meio do estudo da situação em questão. Enfatiza-se que, nesse tipo de pesquisa, a compreensão emerge da análise minuciosa, sólida, coerente e abrangente, além da argumentação lógica das ideias.

De acordo com Sordi (2013), a pesquisa qualitativa procura obter uma compreensão mais aprofundada de situações complexas, em que a coleta de dados é realizada por meio de elementos textuais, amostras, imagens, observações e entrevistas. A análise dos dados é conduzida de maneira subjetiva.

Ainda seguindo Sordi (2013), ele afirma que a pesquisa quantitativa utiliza métodos estatísticos que ajudam no estudo e análise das variáveis por meio da coleta de dados numéricos com uma amostra representativa e instrumentos padronizados. Assim, para esse tipo de pesquisa, busca-se traduzir opiniões e informações numericamente para classificação e análise.

Já do ponto de vista dos objetivos, é possível classificar este estudo como uma pesquisa experimental e explicativa. Para Gil (2007), a pesquisa experimental consiste em determinar um objeto de estudo, selecionar as variáveis que influenciam no processo, definir as formas de controle e de observação dos efeitos que a variável produz no objeto. Ainda segundo o autor, uma pesquisa explicativa pode ser a continuação de uma descritiva, tendo em vista que a identificação de fatores que determinam um fenômeno exige uma descrição e detalhamento elevados.

Do ponto de vista dos procedimentos técnicos, será adotado o estudo de caso. Seguindo o raciocínio de Gil (2007), o estudo de caso possibilita uma compreensão ampla e detalhada do objeto de estudo.

3.1 Amplitude dos Parâmetros Utilizados

Com base na revisão de literatura, e análise dos dados de entrada oferecidos pela empresa HACKER Industrial, foram identificados e analisados como relevantes a realização do estudo de caso utilizando os parâmetros que se encontram nos intervalos apresentados nas Tabelas 4 e 5.

Tabela 4: Parâmetros para soldagem por curto-circuito

Para soldagem por curto-circuito.	
Velocidade de soldagem	3 a 20 centímetros por minutos
Corrente	75 a 200 (A)
Tensão	17 a 24 (V)
Vazão de gás	12 a 16 (L/min)

Fonte: Autor (2023).

Tabela 5: Parâmetros para soldagem por spray pulsado

Para soldagem por <i>spray</i> pulsado.	
Velocidade de soldagem	5 a 25 centímetros por minutos
Corrente (A)	200 a 375 (A)
Tensão	26 a 32 (V)
Vazão de gás	14 a 18 (L/min)

Fonte: Autor (2023).

3.2 Procedimentos Experimentais

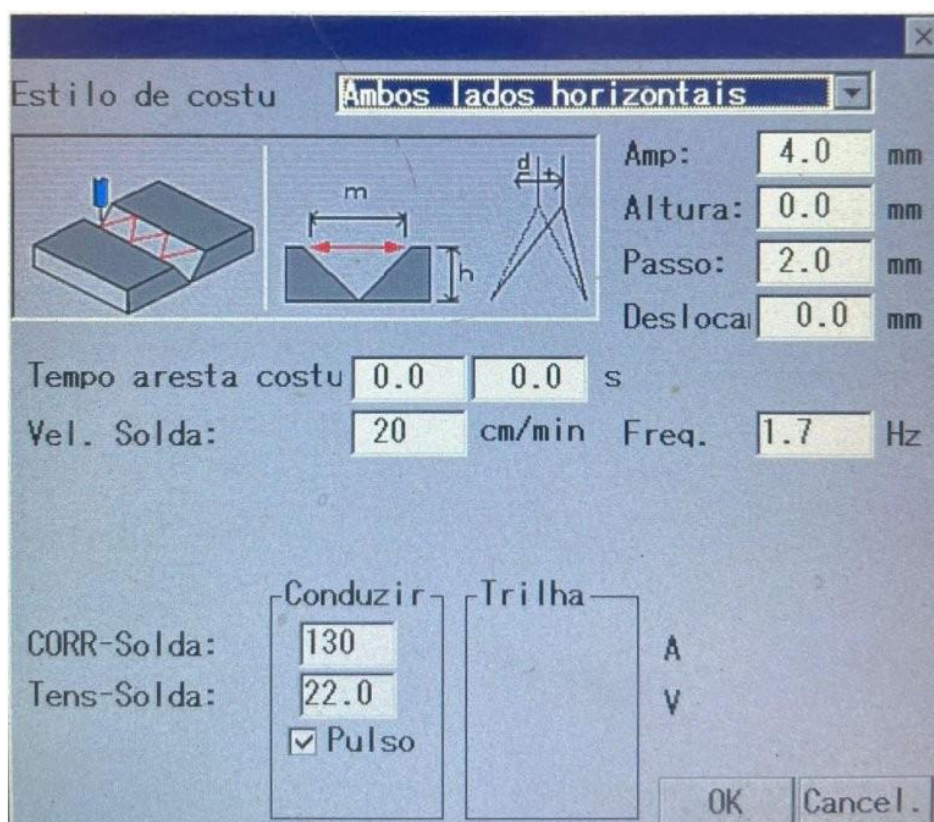
Para realização dos experimentos, foram realizados procedimentos de soldagem em amostras padronizadas que se assemelham aos principais produtos soldados no centro de trabalho robotizado de solda, onde todas as variáveis estão definidas nos subtítulos a seguir.

O número de corpos de prova soldados, definido pelo autor foi de três amostras em cada modo de transferência, sendo duas para realização dos ensaios, e uma para ajuste dos parâmetros de soldagem que foi descartado posteriormente, totalizando seis modelos soldados. Destes quatro corpos de prova que não foram descartados, um dos soldados utilizando a transferência arco *spray* pulsada, foi cortado em seções transversais a soldagem em intervalos de 30mm, descartando as partes iniciais e finais, com o objetivo de utilizar as seções para realização dos ensaios de líquido penetrante e análise metalográfica.

Após prender os corpos de prova a mesa de soldagem, com o auxílio de paquímetros as duas partes do corpo de prova foram posicionadas com uma distância

de 1mm para soldagem da raiz. Depois prendeu-se a peça na posição e foi realizado um ajuste manual dos pontos programados previamente no robô de soldagem, garantindo que todo o cordão de solda seguiria com precisão o chanfro do corpo de prova e realizado um passe para formação da raiz, com baixos valores de corrente e tensão, apresentados na Figura 6.

Figura 6: Parâmetros utilizados para realização da soldagem da raiz



Fonte: Autor (2023).

Para cada corpo de prova, foram cronometrados os tempos necessários para preenchimento total do chanfro com apenas um passe em cada lado, desconsiderando o passe de raiz, já que neste foram utilizados para todos os processos os mesmos parâmetros resultando no mesmo tempo de processo.

3.2.1 Especificações geométricas

Os corpos de prova possuem 25mm de espessura, dimensões de 195 mm de comprimento e 50mm de largura cada e foram chanfrados por meio de usinagem em fresadora convencional do IFSC - Xanxerê, em pares com angulação de 30° cada nas laterais, formando um chanfro em X com ângulo total de 60°, que divide o chanfro na

altura de 15mm e 10 mm, formando um lado A e um lado B, com diferentes volumes para preenchimento, como é possível verificar na Figura 7.

Figura 7: Corpo de prova



Fonte: Autor (2023).

3.2.2 Metal de base

Os corpos de prova utilizados como material de base, foram chapas de aço carbono ASTM A36, com propriedades definidas pela norma da *American Society for Testing and Materials*. O aço ASTM A36 é um aço de construção comum na indústria, utilizado nos mais diversos componentes e sistemas. Trata-se de um aço carbono com boa soldabilidade. Nas Tabelas 6 e 7 são apresentadas as principais propriedades e a composição química deste aço para uma espessura de uma polegada.

Tabela 6: Principais propriedades mecânicas do aço ASTM A36

Material	Limite de escoamento (min)	Resistência a tração	Alongamento (200mm)
ASTM A36	250 MPa	400-550 MPa	20%

Fonte: Adaptado de ASTM A36 (2008).

Tabela 7: Composição do aço ASTM A36

Material	C%(máx)	Si%(máx)	Mn%	P%	S%
ASTM A36	0,25	0,40	0,8 a 1,2	0,04 Máximo	0,05 Máximo

Fonte: Adaptado de ASTM A36 (2008).

3.2.3 Metal de adição

Para a realização da soldagem foi utilizado como material de adição o arame ER70S-6 em forma de arame sólido cobreado, com diâmetro de 1,2mm. O arame é fabricado pela WELD-INOX e sua aplicação é recomendada para aços estruturais com baixo teor de carbono. A composição química e as propriedades mecânicas típicas destes arames são mostradas nas Tabelas 8 e 9.

Tabela 8: Propriedades Mecânicas do arame sólido 1.2 ER70S-6

Limite de escoamento	Limite de resistência a tração	Alongamento	Impacto
400 MPa	480 MPa	22%	27J Mín. a -30°C

Fonte: Adaptado de Weld-Inox (2023).

Tabela 9: Composição química do arame sólido 1.2 ER70S-6

C%	Mn%	Si%	P%	S%	Ní%	Cr%	Mo%	V%	Cu%
0,06-0,15	1,40-1,85	0,80-1,15	0,025 Máx.	0,035 Máx.	0,15 Máx.	0,15 Máx.	0,15 Máx.	0,03 Máx.	0,50 Máx.

Fonte: Adaptado de Weld-Inox (2023).

3.2.4 Gás de proteção

Foi utilizado para realização da soldagem, o gás de proteção Mistura C20. Os gases da classe C20 são classificados como gases de mistura de argônio e dióxido de carbono com uma quantidade de 20% de dióxido de carbono e o restante de argônio e a empresa fornecedora mantém um padrão de excelência de acordo com a ISO 14175. A vazão de gás aplicada foi de 13,8 litros por minuto para a soldagem por curto-circuito, e 17 litros por minuto para soldagem por arco spray pulsado.

Em seus estudos Fischer (2011), destaca que a mistura de gás 82/18 é padronizada para soldagem de aço na Europa no modo de arco pulsado. Entretanto, no Brasil essa mistura é incomum e difícil de encontrar e somente consumidores de grande quantidade de gás de proteção, que usam um sistema de mistura de gás de

proteção autônomo, tem a possibilidade de usar a mistura 82%Ar /18% CO2 com um preço comparável com a mistura 75%Ar /25CO2, que é a mais comum utilizada para soldagem do aço no país. Segundo o autor, a falta da padronização da mistura 82/18 no mercado pode ser um fator que faz a tecnologia de arco pulsado não ter muito sucesso no Brasil.

3.3 Equipamentos utilizados

Para a realização de todo o procedimento, foi utilizado o robô de soldagem PANASONIC TM2000, de propriedade da empresa HACKER Industrial LTDA. Nas figuras 8 e 9 podemos observar o robô de soldagem e suas especificações técnicas.

Figura 8: Robô de soldagem PANASONIC TM2000



Fonte: Powermig (2021).

Figura 9: Especificações técnicas do robô de soldagem PANASONIC TM2000

Graus de Liberdade:	6 Eixos
Capacidade de Carga:	6kg
Repetibilidade:	+/- 0,10 mm
Velocidade dos Eixos:	RT 195%/s UA 197%/s FA 205%/s RW 425%/s BW 425%/s TW 629%/s
Sistema de Acionamento dos Eixos:	Servo Motor
Área de Trabalho Máxima Acessível:	2011 mm
Área de Trabalho Mínima Acessível	574 mm

Fonte: Powermig (2021).

3.3.1 Fonte de soldagem

Para os testes, utilizou-se uma fonte de soldagem da Panasonic, modelo YA-1WAR81YHG, com corrente de saída nominal de 450 Amperes, tensão de saída nominal de 42 volts e ciclo de trabalho nominal de 100%.

3.3.2 Sistema automatizado de soldagem

As soldagens foram realizadas em uma mesa de posicionamento desenvolvida pela POWERMIG, adjunta ao robô PANASONIC TM 2000, e os corpos de prova foram presos a mesa utilizando dispositivos de fixação que prendiam as peças contra a mesa pelo aperto de parafusos, prendendo os quatro cantos dos corpos de prova.

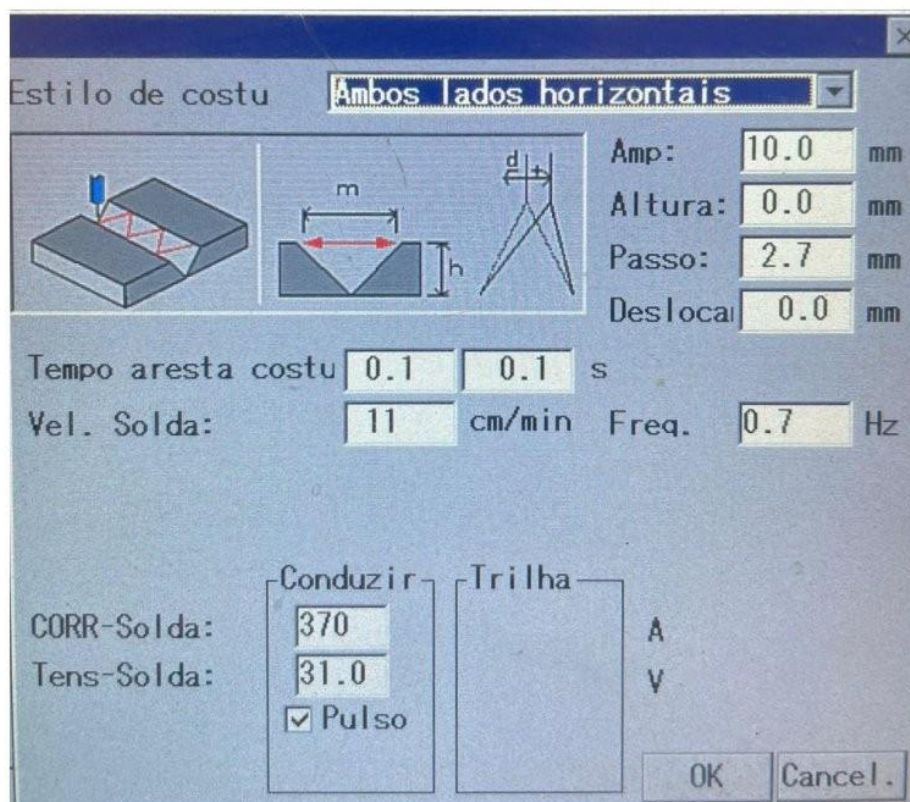
3.3.3 Seleção final dos parâmetros.

Visando atingir o objetivo primário, de otimizar o processo diminuindo o tempo de soldagem, foi optado por realizar testes buscando parâmetros que efetuassem a soldagem em apenas um passe. Utilizando dados armazenados na memória do robô em programas para soldagem de chapas de 1", utilizou-se como parâmetro para teste da soldagem por curto-circuito, 190 ampères de corrente, e 23 volts de tensão, com velocidades de soldagem que variaram de 6 a 4 centímetros por minuto, sendo que com 4 cm/min obteve-se o melhor resultado de preenchimento do chanfro superior, e com 7 cm/min do chanfro inferior, com 2 mm de sobremetal.

Para a soldagem com arco spray pulsado, foi utilizado corrente de 370 ampères, e tensão de 31 volts, com velocidades que variaram de 8 a 14 centímetros por minuto, sendo que os melhores resultados de preenchimento de chanfro foram obtidos com 11 centímetros por minuto para o chanfro superior, e 16 para o inferior, apresentando soldas com 3 mm de sobremetal.

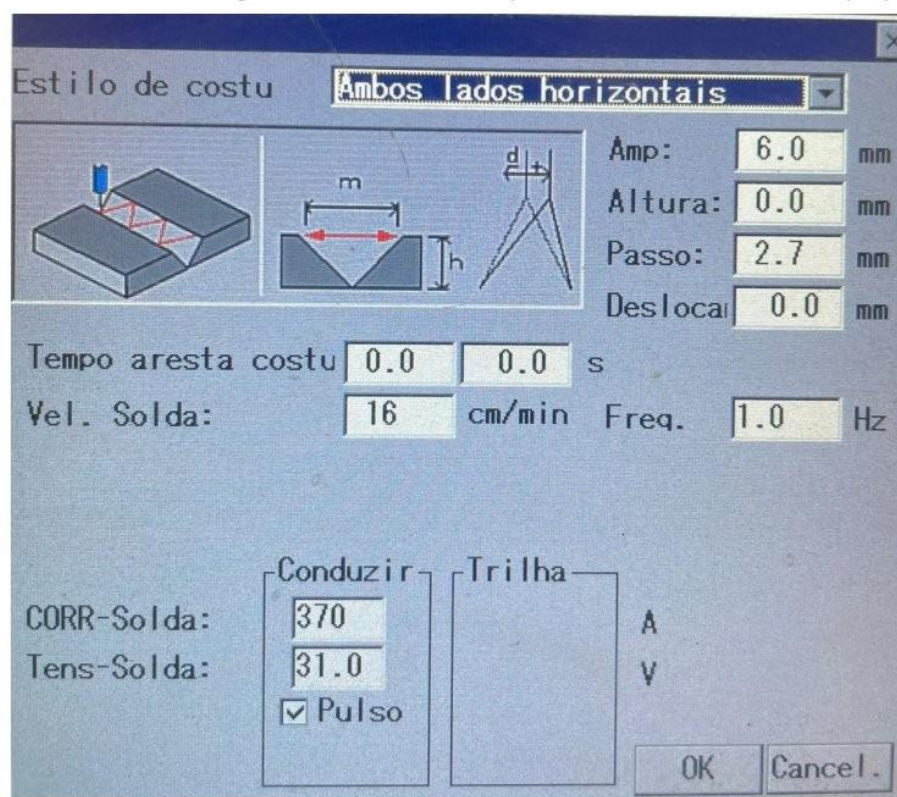
As Figuras 10 a 13 apresentam os parâmetros aplicados na soldagem dos corpos de prova.

Figura 10: Parâmetros de soldagem do chanfro superior pelo modo de transferência spray pulsado



Fonte: Autor (2023).

Figura 11: Parâmetros de soldagem do chanfro inferior pelo modo de transferência spray pulsado



Fonte: Autor (2023).

Figura 12: Parâmetros de soldagem do chanfro superior pelo modo de transferência curto-circuito

Estilo de costu: **Ambos lados horizontais**

Amp: 10.0 mm
 Altura: 0.0 mm
 Passo: 2.5 mm
 Deslocal: 0.0 mm

Tempo aresta costu: 0.1 s
 Vel. Solda: 4 cm/min
 Freq.: 0.3 Hz

CORR-Solda: 190
 Tens-Solda: 23.5
 Pulso

Conduzir: Trilha:

A
 V

OK Cancel.

Fonte: Autor (2023).

Figura 13: Parâmetros de soldagem do chanfro inferior pelo modo de transferência curto-circuito

Estilo de costu: **Ambos lados horizontais**

Amp: 6.0 mm
 Altura: 0.0 mm
 Passo: 2.5 mm
 Deslocal: 0.0 mm

Tempo aresta costu: 0.0 s
 Vel. Solda: 7 cm/min
 Freq.: 0.5 Hz

CORR-Solda: 190
 Tens-Solda: 23.0
 Pulso

Conduzir: Trilha:

A
 V

OK Cancel.

Fonte: Autor (2023).

3.3.4 Ensaio de Líquido Penetrante e Metalografia

A fim de assegurar que a alteração no modo de transferência metálica não resultasse em defeitos e que a qualidade padrão, atualmente observada nas peças soldadas por curto-circuito, seja mantida, foram conduzidos ensaios de líquido penetrante pelo setor de controle de qualidade da empresa HACKER LTDA. Adicionalmente, um ensaio metalográfico foi executado nas instalações do laboratório de metrologia do IFSC Xanxerê.

Para realização do ensaio de líquido penetrante, o inspetor realizou uma limpeza inicial da superfície da peça, e posteriormente aplicou o líquido penetrante SKL-WP2 em toda a superfície. Após um período de aproximadamente vinte minutos, aplicou uniformemente um filme de pó branco SKD-S2, como agente revelador. Em um ambiente com boa iluminação, realizou uma vistoria buscando por descontinuidades para classificação de acordo com o critério de aceitação adotado pela empresa, que se trata da especificação técnica do código ASME, CCH-70 de classe 3, geralmente utilizada na inspeção de fundidos para aplicação em componentes hidráulicos.

Para a análise metalográfica da junta soldada, foram realizados cortes transversais no corpo de prova, que foram lixados e polidos em uma politriz do IFSC Xanxerê. O processo de lixamento foi demorado devido ao tamanho significativo da amostra, e iniciou-se com o uso de lixas com grão 80, que foram sendo substituídas até a utilização de lixa com grão 1200. Após esse procedimento, foi realizado polimento com alumina em suspensão, ao qual o material acabou reagindo e oxidando rapidamente a superfície de estudo, sendo necessário repetir o procedimento de lixamento, e polir novamente a peça com o uso de pasta de diamante, para que pudesse finalmente ser emergida em solução do reagente nital em 2% de diluição, e levada ao microscópio para análise de sua microestrutura.

Esses procedimentos de análise visam verificar a integridade e a qualidade da junta soldada, proporcionando uma avaliação dos efeitos da alteração no modo de transferência metálica. O emprego de ensaios de líquido penetrante e análise metalográfica representam uma abordagem robusta para identificar potenciais falhas ou alterações na estrutura metalúrgica, contribuindo assim para a validação da proposta de mudança no processo de soldagem.

4. RESULTADOS E DISCUSSÕES

O presente capítulo dedica-se à apresentação e análise dos resultados obtidos no contexto do objetivo geral de otimizar o procedimento de soldagem de uma célula robotizada em uma empresa metalmecânica.

Após realizado o procedimento de soldagem em todos os corpos de prova, as Tabelas 10 a 13 apresentam os resultados obtidos em função do tempo para os parâmetros selecionados.

Tabela 10: Tempos de soldagem

Corpo de Prova 1. Para soldagem por spray pulsado.	
Velocidade de soldagem, lado A	9 centímetros por minuto
Tempo de soldagem lado A	129,31 segundos
Velocidade de soldagem, lado B	12 centímetros por minuto
Tempo de soldagem lado B	97,38 segundos
Tempo total do procedimento	226,69 segundos

Fonte: Autor (2023).

Tabela 11: Tempos de soldagem

Corpo de Prova 2. Para soldagem por spray pulsado.	
Velocidade de soldagem, lado A	11 centímetros por minuto
Tempo de soldagem lado A	104,18 segundos
Velocidade de soldagem, lado B	16 centímetros por minuto
Tempo de soldagem lado B	72,76 segundos
Tempo total do procedimento	176,94 segundos

Fonte: Autor (2023).

Tabela 12: Tempos de soldagem

Corpo de Prova 3. Para soldagem por curto-circuito.	
Velocidade de soldagem, lado A	4 centímetros por minuto
Tempo de soldagem lado A	293,4 segundos
Velocidade de soldagem, lado B	8 centímetros por minuto
Tempo de soldagem lado B	168,1 segundos
Tempo total do procedimento	461,5 segundos

Fonte: Autor (2023).

Tabela 13: Tempos de soldagem

Corpo de Prova 4. Para soldagem por curto-circuito.	
Velocidade de soldagem, lado A	5 centímetros por minuto
Tempo de soldagem lado A/	234,4 segundos
Velocidade de soldagem, lado B	8 centímetros por minuto
Tempo de soldagem lado B	146,7 segundos
Tempo total do procedimento	381,1 segundos

Fonte: Autor (2023).

Fazendo a análise dos valores apresentados nas tabelas deste capítulo, podemos realizar a comparação entre o tempo de processo utilizando os parâmetros atuais de soldagem por curto-circuito e os resultados alcançados por meio dos testes de soldagem por arco spray pulsado realizados nos corpos de prova.

De acordo com as mesmas tabelas, pode-se afirmar que o procedimento por arco spray pulsado reduziu o tempo necessário para realização dos procedimentos de soldagem em até 175%, gerando um aumento de produtividade e eficiência da célula robótica.

Quanto aos objetivos específicos delineados para esta pesquisa, estes desdobram-se em quatro frentes distintas que serão abordadas a seguir.

Primeiramente, visou-se garantir a aprovação da junta soldada pela garantia da qualidade, empregando análise com ensaio por líquido penetrante como meio de identificação de descontinuidades superficiais. Este objetivo foi alcançado perante inspeção do departamento de qualidade da empresa Hacker Ltda, realizado por profissional inspetor da qualidade e assinado pelo gerente da qualidade, recebendo aprovação de acordo com o critério de aceitação CCH 70-4 Classe 3. O relatório de conformidade pode ser conferido nas Figuras 14 e 15.

Figura 14: Relatório de conformidade

Identificação/Identification		
Projeto/Project: TCC	OF:	
Peça/Part: CORPO DE PROVA	Desenho/Design:	
Quantidade/Amount: 2	Posições/Positions: 1	
Informações do produto/Product information		
Líquido Penetrante Penetrating liquid	SKL-WP2 Fabricante/Manufacturer: SPOTCHECK Lote/Batch: 2301002204/SQ	
Removedor/Remover:	ÁGUA Fabricante/Manufacturer: N/A Lote/Batch: N/A	
Revelador/Revealing:	SKD-S2 Fabricante/Manufacturer: SPOTCHECK Lote/Batch: 231005607/SQ	
Dados do ensaio/Test data		
Condição Superficial: Surface Condition	POLIDA Norma de Referência: ASME V Reference norm	
Metal Base: Base metal	ASTM A36 Processo: SOLDAGEM POR ARCO SPRAY Process	
Metal de Adição: Adding Metal	WI M76 ER 7056 Espessura (mm): Thickness 1"	
Soldador/Sinete: Welder/Signet	ROBO DE SOLDA Tipo de Junta: DUPLO V Type of Board	
Resultado/Result		
Tipo/Type	Aprovado/Approved	Reprovado/Disapproved
Raiz/Root	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>
Interpasse/Interpass	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>
Acabamento/Finish	<input checked="" type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>
Critério de aceitação/Acceptance Criterion: CCH 70-4 Classe 3		
Observações/Comments: Ensaio realizado conforme Procedimento PH 052. performed according to Procedure PH 052.		Test
		OK - CONFERIDO QUALIDADE
Fotos do ensaio seguem em anexo/Photos of the test are attached.		
Gestão da Qualidade: ALCIDES ANDRADE FILHO Quality management Alcides Andrade Filho Gerente da Qualidade	Inspetor: GILNEI TRAMONTINA Gauging Gilnei Tramontina	Cliente Client

FML 004 - ENSAIO NÃO DESTRUTIVO DE LÍQUIDO PENETRANTE/NON-DESTRUCTIVE TEST OF PENETRATING LIQUID

Fonte: Autor (2023).

Figura 15: Relatório de conformidade




ENSAIO NÃO DESTRUTIVO DE LÍQUIDO PENETRANTE

NON-DESTRUCTIVE TEST OF PENETRATING LIQUID

Nº: EN-001

DATA: 10/11/2023

Identificação/Identification

Projeto/Project: TCC OF:

Peça/Part: CORPO DE PROVA Desenho/Design:

Quantidade/Amount: 2 Posições/Positions: 1

Fotos do ensaio seguem em anexo/Photos of the test are attached.



10 de nov. de 2023 13:23:43
PEÇA 1
ENSAIO LP
CARLOS



10 de nov. de 2023 13:27:11
PEÇA 1
ENSAIO LP
CARLOS



10 de nov. de 2023 13:35:37
PEÇA 1
ENSAIO LP
CARLOS



10 de nov. de 2023 13:36:07
PEÇA 2
ENSAIO LP
CARLOS

Gestão da Qualidade: ALCIDES ANDRADE FILHO Quality management Alcides Andrade Filho Gerente da Qualidade	Inspetor: GILNEI TRAMONTINA Gauging <i>Gilnei Tramontina</i>	Cliente Client
--	--	---

FML 004 - ENSAIO NÃO DESTRUTIVO DE LÍQUIDO PENETRANTE/NON-DESTRUCTIVE TEST OF PENETRATING LIQUID

OK - CONFERIDO QUALIDADE

Fonte: Autor (2023).

Em seguida, procedeu-se à análise da qualidade e penetração da solda através de ensaios visuais em seções do corpo de prova já lixados, polidos e atacados quimicamente com reagente nital em solução de 2% facilitando a identificação da junta soldada, e da zona termicamente afetada. O resultado desse processo foram imagens claras onde podemos diferenciar com clareza essas áreas de interesse, como mostrado nas Figuras 15 e 16, alcançando assim o segundo objetivo específico do estudo.

Figura 16: Análise visual de sessão do corpo de prova 1



Fonte: Autor (2023).

Figura 17: Análise visual de sessão do corpo de prova 2

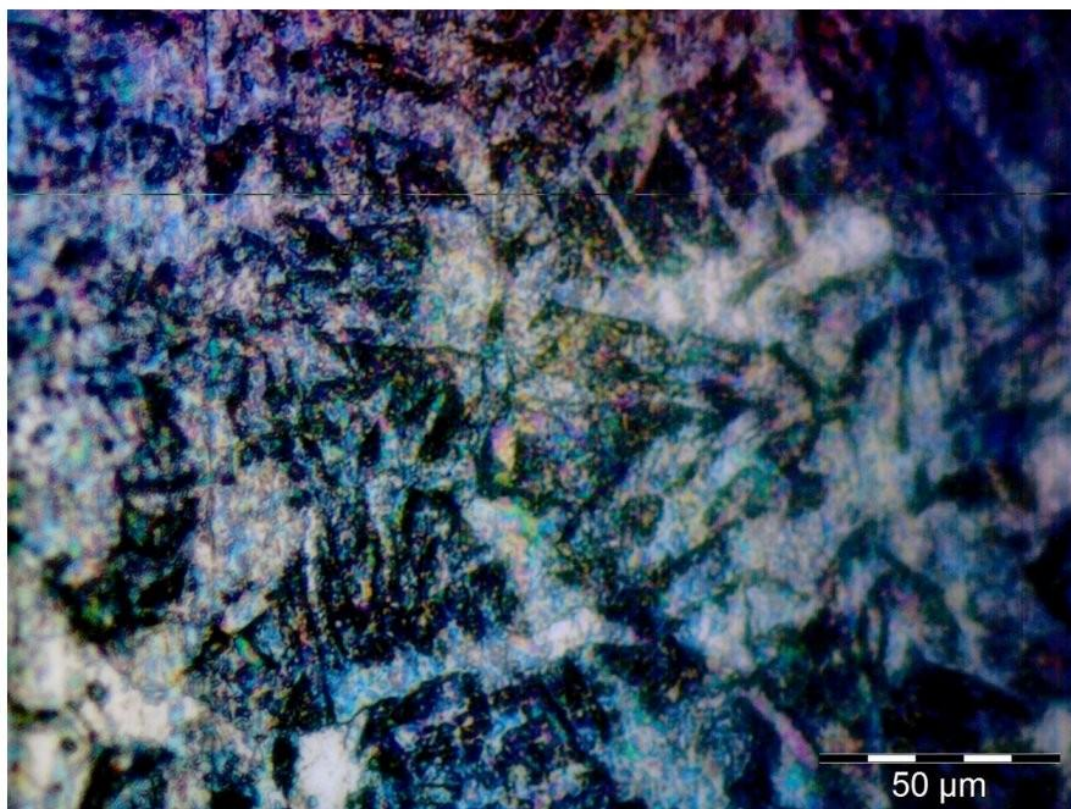


Fonte: Autor (2023).

Além do estudo visual macroscópico, uma abordagem mais detalhada foi adotada com a realização de análise metalográfica, ensaio que permite observar a microestrutura tanto da junta soldada quanto da zona termicamente afetada pelo procedimento de soldagem por arco spray pulsado, buscando melhor compreender os efeitos do processo em uma visão microestrutural do material soldado. Durante o processo de lixamento e polimento da amostra, diversas dificuldades foram encontradas e após diversas tentativas, não foi possível obter imagens satisfatórias da microestrutura da junta soldada, mesmo com o auxílio de profissionais qualificados. Deste ensaio, apenas uma imagem apresentou certa clareza passível de análise, mas insuficiente para fornecer conclusões a respeito da microestrutura do material.

Podemos observar o resultado na Figura 18.

Figura 18: Análise metalográfica da seção do corpo de prova



Fonte: Autor (2023).

Finalmente, buscou-se sugerir melhorias no procedimento de soldagem vigente, propondo alterações nos parâmetros e consumíveis necessários para a obtenção de um processo mais eficiente. Tal proposta foi avaliada considerando os aspectos de custos, qualidade e tempo de processo.

Considerando que os aspectos vinculados ao tempo de processo e à qualidade do produto soldado foram previamente abordados nos objetivos anteriores, elaborou-se uma tabela destinada à comparação apenas dos custos associados às operações nos distintos modos de transferência metálica.

Vale ressaltar que a execução do processo de soldagem abrange diversos elementos que podem influenciar seu custo global, incluindo a utilização de consumíveis (tais como metal de adição, gás, entre outros), despesas com mão de obra, consumo de energia, manutenção e depreciação dos equipamentos, além dos custos associados aos materiais de proteção individual ou coletiva, peças, ferramentas e outros insumos.

Verificando quais destes elementos seriam mais influentes no presente estudo, conclui-se que a maior parte dessas variáveis permaneceriam inalteradas, e para simplificar a análise de custos, optou-se por utilizar o valor de custo hora máquina fornecido pela empresa, de R\$374,00 reais por hora, que já leva em consideração todos os fatores destacados como influentes no custo da soldagem, e comparar apenas as variáveis que sofreram algum tipo de alteração, neste caso, o tipo de gás de proteção e o consumo de arame.

Analisando o consumo por hora do arame como metal de adição, o aumento deste consumível foi verificado como inversamente proporcional ao tempo, resultado esperado, tendo em vista que o volume de metal de adição necessário para preenchimento completo do chanfro é o mesmo nos dois modos de transferência. Dessa forma, existe um aumento no custo hora máquina, mas que se traduz em produção. Quanto a alteração do gás de proteção, e sua respectiva taxa de vazão, constatou-se um aumento na relação custo hora, também esperado já que além do aumento de vazão por minuto, a mistura C20 possui maior concentração de argônio em relação a mistura C25. Entretanto, quando analisamos o gás em relação a deposição de material, esse valor diminui em relação aos do processo por curto-circuito.

A Tabela 14 demonstra esses valores para soldagem de um metro de chanfro.

Tabela 14: Custos em gás de proteção para soldagem de um metro de chanfro

Modo de transferência	Gás	Valor (m³)	Vazão (L/min)	Tempo (min)	Custo
Curto-circuito	C25	R\$ 25,00	13,8	37,50	R\$ 12,94
Spray pulsado	C20	R\$ 27,00	17,0	15,34	R\$ 07,04

Fonte: Autor (2023).

Com base nessa análise podemos concluir que apesar do aumento no valor por metro cúbico do gás de proteção, e também na sua taxa de vazão, o custo total do processo diminui, tendo em vista que os menores tempos de arco aberto compensam essas alterações.

5. CONCLUSÃO

Diante dos objetivos estabelecidos para otimizar o procedimento de soldagem em uma célula robotizada em uma empresa metalmeccânica, os resultados obtidos por meio dos testes de soldagem por arco spray pulsado demonstram uma significativa melhora no tempo de processo em relação aos parâmetros convencionais de soldagem por curto-circuito.

A análise dos resultados revelou uma redução expressiva de até 175% no tempo necessário para realizar um procedimento de soldagem, resultando em um aumento notável de produtividade e eficiência da célula robótica. Este ganho de eficiência está alinhado ao Objetivo Geral deste estudo, destacando a viabilidade e benefícios práticos da implementação do arco spray pulsado.

No que diz respeito aos objetivos específicos, a garantia da qualidade, avaliada pelo ensaio por líquido penetrante, resultou na aprovação da junta soldada de acordo com os padrões de aceitação estabelecidos pela empresa Hacker Ltda. A análise visual proporcionou uma boa compreensão da penetração da solda, e embora a obtenção de imagens satisfatórias da microestrutura pela análise metalográfica da junta soldada tenha apresentado desafios, também não foram encontradas presenças de nenhum tipo de descontinuidade ou falha que colocaria em risco a aceitação do produto. Porém um estudo mais aprofundado pode ser interessante para compreensão de qual fator dificultou a análise metalografia no corpo de prova.

A sugestão de melhoria no procedimento de soldagem atual, conforme delineado no objetivo D, considerou fatores como custos, qualidade e tempo de processo. A comparação de custos entre os modos de transferência metálica evidenciou que, embora muitos fatores permaneçam inalterados, o tempo de soldagem, a taxa de vazão de gás de proteção e a energia necessária são áreas-chave para potenciais melhorias.

Dessa forma, este estudo não apenas atingiu seus objetivos propostos, mas também fornece uma base sólida para a implementação prática das descobertas, destacando o potencial do arco spray pulsado como uma alternativa vantajosa no processo de soldagem robotizada. Estas conclusões abrem caminho para futuras pesquisas e aprimoramentos contínuos na busca por eficiência e qualidade na soldagem industrial.

5.1 Sugestão para trabalhos futuros

Com base nos resultados obtidos neste estudo, torna-se evidente que existem oportunidades para futuras pesquisas e desenvolvimento no campo da soldagem, especialmente quanto ao uso de técnicas de soldagem que não são bem aproveitadas nas indústrias pela falta de conhecimento ou aceitação. Algumas sugestões para trabalhos futuros são:

1. Análise completa da variação dos custos de soldagem de acordo com o modo de transferência metálica.
2. Otimização da soldagem por spray pulsado para materiais específicos.
3. Análise da Influência do Gás de Proteção na Soldagem por Spray Pulsado.

Esses estudos podem contribuir para o aprimoramento da compreensão e aplicação da soldagem por spray pulsado, resultando em avanços significativos na qualidade das juntas soldadas e na eficiência do processo.

6. REFERÊNCIAS

ANDREUCCI, Ricardo. **Líquidos penetrantes**. [S. l.]: Abende, 2014. Disponível em: <<https://infosolda.com.br/wp-content/uploads/Downloads/andreucci/LP-2014.PDF>>. Acesso em: 08 dez. 2023.

Anon: "Classification of Metal Transfer." IIW Doc. XII-636-76. 1976.

BUDYNAS, R. G.; NISBETH, J. Keith. **Elementos de Máquinas de Shigley-10ª Edição**. McGraw Hill Brasil, 2016.

ESAB, B. R.; VAZ, C. T. Soldagem MIG/MAG. **Assistência Técnica. Revisão**, 2005. FELIZARDO, I., Apostila - **Tecnologia da soldagem**. CENTRO FEDERAL DE EDUCAÇÃO TECNOLÓGICA DE MINAS GERAIS - CEFET-MG, Versão fevereiro 2016 – março 2018. Disponível em: <<https://www.dem.cefetmg.br/wp-content/uploads/sites/39/2017/09/Apostila-Tecnologia-da-Soldagem.pdf>>. Acesso em: 21 abr. 2023.

FISCHER, A. **Estudo da influência dos parâmetros no processo de soldagem GMAW-Arco Pulsado**. 2011.

GIL, A. C. **Como elaborar projetos de pesquisa**. 4. ed. São Paulo: Atlas, 2007.

GUILE, A.: Electric arcs - Their electrode processes and engineering applications , EIEE Proceedings, Part A - **Physical Science**, Measurement and Instrumentation, Management and Education, Reviews (ISSN 0143-702X), vol. 131, pt. A, no. 7, Sept. 1984, p. 450-480.

HERMANS, M.J.M.; DEN OUDEN, G.: Process Behavior and Stability in Short Circuit Gas Metal Arc Welding, **Welding Journal** v. 78 no4 137s-141s Ap '99. JEFFUS, L. F.: **Welding: Principles and Applications**, Edition: 5, Cengage Learning, 2002 ISBN 1401810462, p218 –225.

LUCAS, W.; IORDACHESCU, D.; PONOMAREV ,V.: **Classification of Metal Transfer Modes in GMAW**, IIW Doc. No XII-1859-05, Prague, 2005.

MARQUES, P. V.; MODENESI, P. J.; BRACARENSE, A. Q., **Soldagem: Fundamentos e Tecnologia**. 3. ed. Belo Horizonte: UFMG, 2009.

MARQUES, P. V., MODENESI, P. J., BRACARENSE, A. Q., **Soldagem: Fundamentos e Tecnologia**, Belo Horizonte, Editora UFMG, 2007.

MARQUES, P. V., MODENESI, P. J., BRACARENSE, A. Q., **Soldagem: Fundamentos e Tecnologia**, Belo Horizonte, Editora UFMG, 2016. Disponível em: <<https://app.minhabiblioteca.com.br/#/books/9788595156067/>>. Acesso em: 06 jun. 2023.

MATTHES, K.-J.; RICHTER, E.: **Schweißtechnik**, 2. Auflage, Fachbuchverlag Leipzig im Carl hanser Verlag, 2003, ISBN 3-446-22046-1.

MICHEL, M. H., **Metodologia e pesquisa científica em ciências sociais**: um guia prático para acompanhamento da disciplina e elaboração de trabalhos monográficos. 3. ed. São Paulo: Atlas, 2015.

MICALLI J. A. R., BATALHA J. R., RAZERA R., MARIUCCI S. L., **Manual de Tecnologia de Fabricação e Soldagem**. São Paulo, 2002. Disponível em: <http://ftp.demec.ufpr.br/disciplinas/EngMec_NOTURNO/TM354/Manual%20de%20Processos%20de%20Soldagem.pdf>. Acesso em: 12 abr. 2023.

MODENESI, P. J., BRACARENSE, A. Q., **Introdução à Física do Arco Elétrico e sua Aplicação na Soldagem dos Metais**, Belo Horizonte, 2012.

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

NORRISH, J.: **Process Control and Automation Developments in Welding**, Proceedings of the 8th International Conference, 2009.

SCOTTI, A., PONOMAVEV, V. **Soldagem MIG/MAG**: Melhor entendimento, melhor desempenho. São Paulo, Artliber Editora, 2008.

SENAI, "**Soldagem**", 5 Edição, São Paulo - Brasil, Senai, 1997. p130.

SMITH, A.: **CO2 Welding of Steel**. Cambridge, U.K.: The Welding Institute, 1966, 21-25.

SODERSTROM, E.J., MENDEZ P. F.: Metal Transfer during GMAW with Thin Electrodes and ArCO2 Shielding Gas Mixtures, **Welding Journal**, MAY 2008, VOL. 87, p.124-p.133.

SORDI, J. O. de., **Elaboração de pesquisa científica: seleção, leitura e redação**. 1. ed. São Paulo: Saraiva, 2013.

WAINER, E., BRANDI, S. e MELLO, F. D.H., **Soldagem**: Processos e Metalurgia. São Paulo, Edgard Blücher, 1992.