

**UNIVERSIDADE FEDERAL DE SÃO CARLOS
CENTRO DE CIÊNCIAS EXATAS E DE TECNOLOGIA
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM CIÊNCIA E
ENGENHARIA DE MATERIAIS**

MAPEAMENTO DE PARÂMETROS DE SOLDAGEM ROBOTIZADA GMAW
VISANDO TEMPOS DE PRODUÇÃO REDUZIDOS PARA JUNTAS DO AÇO
ASTM A572 G50

João Renato Arbex

São Carlos-SP
2022

**UNIVERSIDADE FEDERAL DE SÃO CARLOS
CENTRO DE CIÊNCIAS EXATAS E DE TECNOLOGIA
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM CIÊNCIA E
ENGENHARIA DE MATERIAIS**

MAPEAMENTO DE PARÂMETROS DE SOLDAGEM ROBOTIZADA GMAW
VISANDO TEMPOS DE PRODUÇÃO REDUZIDOS PARA JUNTAS DO AÇO
ASTM A572 G50

João Renato Arbex

Dissertação apresentada ao
Programa de Pós-Graduação em Ciência e
Engenharia de Materiais como requisito
parcial à obtenção do título de MESTRE EM
CIÊNCIA E ENGENHARIA DE MATERIAIS

Orientador: Dr. José Eduardo Spinelli

Coorientador: Dr. Erik Åstrand

São Carlos-SP
2022

DEDICATÓRIA

Dedico este trabalho aos meus pais, Nabih Arbex e Maria Claudeni Marin Arbex, e à minha irmã, Laura Arbex, por serem o alicerce em minha vida. Também à minha noiva, Bruna Mafra, por estar sempre ao meu lado.

VITAE

Bacharel em Engenharia de Materiais pela Universidade Federal de São Carlos
(2014).



UNIVERSIDADE FEDERAL DE SÃO CARLOS

Centro de Ciências Exatas e de Tecnologia
Programa de Pós-Graduação em Ciência e Engenharia de Materiais

Folha de Aprovação

Defesa de Dissertação de Mestrado do candidato João Renato Arbex, realizada em 15/09/2022.

Comissão Julgadora:

Prof. Dr. José Eduardo Spinelli (UFSCar)

Prof. Dr. Guilherme Zepon (UFSCar)

Prof. Dr. Bismarck Luiz Silva (UFRN)

O Relatório de Defesa assinado pelos membros da Comissão Julgadora encontra-se arquivado junto ao Programa de Pós-Graduação em Ciência e Engenharia de Materiais.

AGRADECIMENTOS

À minha família, pelo carinho, apoio, paciência e que, acima de tudo, me motivaram mesmo nos momentos em que eu mesmo não acreditava que iria dar certo.

À Bruna Mafra, por todo amor e carinho mesmo nos momentos de revolta e impaciência, pela compreensão nas minhas ausências e por me colocar de volta aos trilhos quando algo não saía como planejado.

Ao professor José Eduardo Spinelli pela orientação, conversas, exemplos, sem dúvida foi uma grande contribuição para meu desenvolvimento, sendo mais que um orientador, um amigo. Também ao engenheiro PhD Erik Åstrand pela coorientação e suporte no desenvolvimento deste trabalho e trajetória profissional.

Aos colegas na UFSCar pelo apoio e suporte para o desenvolvimento deste trabalho, principalmente Guilherme Lisboa, além dos professores Dr. Tomaz Ishikawa e Guilherme Zepon, com ótimas colaborações durante a qualificação.

Por fim, mas não menos importante, a todos os amigos de trabalho que contribuíram com sugestões, conhecimento e grande auxílio na execução dos testes e corpos de prova.

O presente trabalho foi realizado com apoio da Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior - Brasil (CAPES) - Código de Financiamento 001.

RESUMO

O processo de soldagem por arco elétrico com gás de proteção (GMAW - *Gas Metal Arc Welding*) é extremamente difundido e utilizado em diversas aplicações. Isso se deve à sua alta produtividade aliada ao baixo custo, além de sua adequação ao alto nível de automação. No entanto, o desenvolvimento de tecnologia para um processo já tradicional é sustentado por demandas constantes. Um dos mais importantes está relacionado ao aumento da produtividade na indústria para que se atinjam maiores taxas de deposição de material de enchimento. Aumentar a velocidade de deslocamento no processo de soldagem é uma das formas mais diretas e eficazes de atender a essa demanda. No entanto, como os processos comumente disponíveis atingem um limite, há a necessidade de tecnologias recentes para superar tais limitações. Os objetivos deste trabalho são aumentar a velocidade de deslocamento da soldagem de juntas em ângulo sem preparação do aço ASTM A572 G50 pelo processo GMAW para que os tempos de ciclo possam ser reduzidos. O ponto de partida é entender o estado inicial e realizar testes, suportados por métodos de análise de processo SIPOC-Y e mapa de processos, em uma estação de soldagem robotizada, através da variação dos parâmetros de soldagem, seguidos de análises visuais e macrográficas procurando defeitos e atendendo às especificações das juntas. Além disso, comparar as microestruturas e as durezas de juntas soldadas pelo processo pulsado convencional e PMC (*Pulse Multi Control*). A mudança do processo de arco pulsado convencional para PMC resultou em um aumento de 40% na velocidade de deslocamento da soldagem, o que significa uma redução média de 32% no tempo de processo no caso estudado.

Palavras-chave: Solda; GMAW; MIG-MAG; Solda robotizada; Velocidade soldagem; PMC.

ABSTRACT

MAPPING OF GMAW ROBOTIC WELDING PARAMETERS AIMING AT REDUCED PRODUCTION TIMES FOR ASTM A572 G50 STEEL JOINTS

The welding process using electric arc with shielding gas (GMAW - Gas Metal Arc Welding) is extremely widespread and used in several applications. This is due to its high productivity combined with low cost in addition to its suitability to high automation level. The technology development for an already traditional process is supported by constant demands. One of the most important is related to increase productivity in the industry so that achieving higher filler material deposition rates. Increasing the travel speed in welding process is one of the most straight through and effective ways to meet this demand. However, as the commonly available processes reach a limit, there is a need of recent technologies to overcome such limitations. As such, for any innovative technology there are challenges to be overcome, which require studies to understand its operation and application in a way that promotes the desired results without compromising the required quality. The goals of this work are increase the welding travel speed so that the cycle times could be reduced. The starting point is to understand the initial state and conduct tests, aiming at achieving high travel speeds through the variation of welding parameters, followed by visual and macrographic analysis looking for defects and meeting specifications of the joints. Changing process from standard pulsed arc to PMC results on a 50% increase on welding travel speed which means an average 32% reduction on process time on the studied case.

Keywords: Welding; GMAW; Robot welding; Travel speed; PMC

ÍNDICE DE ASSUNTOS

	Pág.
FOLHA DE APROVAÇÃO.....	i
AGRADECIMENTOS	iii
RESUMO.....	v
ABSTRACT	vii
SUMÁRIO.....	ix
ÍNDICE DE TABELAS	xi
ÍNDICE DE FIGURAS	xiii
SÍMBOLOS E ABREVIATURAS.....	xvii
1 INTRODUÇÃO	1
1.1 Enunciado do problema	1
1.2 Motivação.....	2
1.3 Objetivo.....	3
2 REVISÃO DA LITERATURA.....	5
2.1 Soldagem através do processo GMAW	5
2.2 Soldagem robotizada	10
2.3 Transferência metálica por arco pulsado e soldagem MIG/MAG pulsado sinérgico.....	12
2.4 Processo soldagem PMC – <i>Pulse Multi Control</i>	14
2.5 Características do aço ASTM A572 G50	17
2.6 Qualidade de juntas soldadas	19
2.6.1 Geometria juntas soldadas	20
2.6.2 Defeitos dos cordões solda.....	22
2.6.3 Estrutura e propriedades.....	24
2.7 Métodos de análise do processo – SIPOC-Y e Mapa de processo.....	29
3 MATERIAIS E MÉTODOS	33
3.1 Materiais e equipamento de solda	33
3.2 Métodos	35
Definição da meta de velocidade de deslocamento	35
3.2.1 Análise do processo.....	35
3.2.2 Soldagem.....	36

3.2.3	Ensaio de caracterização dos cordões de solda	38
4	RESULTADOS E DISCUSSÃO	45
4.1	Definição da meta de velocidade de deslocamento	45
4.2	SIPOC-Y	49
4.3	Mapa de processo.....	51
4.4	Testes iniciais.....	51
4.5	Revisão do mapa de processo.....	56
4.6	Testes <i>IN LOCO</i>	58
4.7	Dureza Vickers.....	65
4.8	Micrografias	67
4.9	Tempos de ciclo	70
5	CONCLUSÕES	73
6	SUGESTÕES PARA FUTUROS TRABALHOS	75
7	REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS.....	77

ÍNDICE DE TABELAS

	Pág.
Tabela 1: Composição química do aço ASTM A572 Gr50 [17].	19
Tabela 2: Defeitos de soldagem.....	23
Tabela 3: Composição química do metal de adição AWS A5.18 ER70S-6 [33].	35
Tabela 4: Etapas para realização do trabalho e seus objetivos.	35
Tabela 5: Tempos de ciclo e suas divisões correspondentes ao estado inicial do processo de soldagem robotizada das peças 1, 2, 3 e 4.	46
Tabela 6: Contagem do número de especificações de garganta de solda nas peças 1, 2, 3 e 4 produzidas pela estação soldagem robotizada.	47
Tabela 7: Velocidade de deslocamento (em cm/min) para cada peça.	47
Tabela 8: Comparação tempos de ciclo calculado e simulados na programação off-line após ajuste da velocidade de soldagem para 46 cm/min nas soldas a5 posições 1F e 2F.....	48
Tabela 9: Parâmetros iniciais associados a solda tipo a5.	52
Tabela 10: Parâmetros de soldagem inicialmente definidos para testes in loco em solda a5 e posições 1F e 2F.	59
Tabela 11: Parâmetros de soldagem redefinidos para testes em solda a5 e posições 1F e 2F.....	61
Tabela 12: Dimensões obtidas para cordão a5 e posições 1F e 2F após testes <i>in loco</i>	65
Tabela 13: Tempos de ciclo otimizados após implementação do novo processo de soldagem PMC que permitiu maiores velocidades de deslocamento.	71

ÍNDICE DE FIGURAS

	Pág.
Figura 1: Representação esquemática mostrando robô de soldagem como “gargalo” de produção de uma determinada célula de soldagem.....	2
Figura 2: Equipamentos utilizados no processo MIG/MAG e ilustrações (arco, transferência metálica, poça de fusão, bico de contato, distância bico de contato - peça (DBCP) [4].	6
Figura 3: Representação esquemática do processo de soldagem através de operações MIG/MAG [5].	6
Figura 4: Representação esquemática dos efeitos decorrentes do tipo de gás no formato do cordão de solda [6].	7
Figura 5: Influência da tensão e da corrente de soldagem no modo de transferência metálica [7].	10
Figura 6: Exemplo de um posicionador de soldagem [10].	11
Figura 7: Ilustração das posições de soldagem 1F e 2F para juntas de ângulo.	11
Figura 8: Representação esquemática de parte dos componentes de uma célula de soldagem robotizada [11].	12
Figura 9: Influência da corrente de soldagem no modo de transferência metálica [12].	13
Figura 10: Formato de onda associado a um processo pulsado sinérgico [14] [15].	15
Figura 11: Etapas de formação e destacamento de gota no modo de transferência metálica pulsado [14] [15].	16
Figura 12: Etapas de formação e destacamento de gota no modo de transferência metálica pulsado com uso do processo PMC [14] [15].	17
Figura 13: Ilustração das definições de garganta e perna de solda em uma junta de ângulo.....	21
Figura 14: Definição penetração de raiz e raio de transição.	22
Figura 15: Efeito do preaquecimento no ciclo de solda em juntas de aço.....	25
Figura 16: Relações entre a dureza e o limite de resistência a tração para o aço, latão e ferro fundido [24].	26

Figura 17: Micrografias óptica do aço ASTM A572 G50 [27].	27
Figura 18: Micrografias óticas das regiões de grãos grosseiros (GG), grãos finos (GF), intercrítica (IC) e subcrítica (SC) da zona afetada pelo calor (ZAC) do aço ASTM A572 G50 [27].	28
Figura 19: Micrografia metal de solda do aço ASTM A572 G50 [27].	29
Figura 20: Representação dos corpos de prova soldados usando chapas do aço ASTM A572 GR50 (Dimensões em mm).	34
Figura 21: Arranjo experimental de testes soldagem realizados pelo fabricante da máquina de solda.	36
Figura 22: Arranjo experimental de testes soldagem realizados na célula produtiva.	37
Figura 23: Dimensionamento do cordão de solda.	38
Figura 24: Cálculo de raio e bloco padrão [19].	39
Figura 25: Perfil de microdureza Vickers de juntas em ângulo de acordo com a norma ISO 9015-2 [26].	41
Figura 26: Identificação segmentos de reta do perfil de dureza Vickers [26].	42
Figura 27: Localização do traçado dos segmentos de dureza Vickers.	43
Figura 28: Pontos iniciais dos perfis de dureza Vickers.	43
Figura 29: Diagrama SIPOC – Y para análise do processo de soldagem robotizada.	50
Figura 30: Mapa de processo inicial da soldagem robotizada estudada.	51
Figura 31: Aspecto visual do cordão de solda associado ao teste inicial para cordão a5 e posição 1F.	52
Figura 32: macrografia resultante do teste inicial para cordão a5 e posição 1F.	53
Figura 33: Dimensões em mm da garganta e penetração raiz obtidos a partir de teste inicial para cordão a5 e posição 1F.	53
Figura 34: Aspecto visual do cordão de solda associado ao teste inicial para cordão a5 e posição 2F.	54
Figura 35: Macrografia resultante do teste inicial para cordão a5 e posição 2F.	55

Figura 36: Dimensões em mm da garganta e penetração raiz obtidos a partir de teste inicial para cordão a5 e posição 2F.	56
Figura 37: Revisão mapa de processo após testes iniciais.	57
Figura 38: Aspecto visual obtido em testes in loco para cordão a5 e posições 1F e 2F soldados após redefinição dos parâmetros de solda conforme Tabela 11.	62
Figura 39: Macrografias da seção transversal de amostras testadas in loco para cordão a5 e posições 1F e 2F soldados após redefinição dos parâmetros de solda conforme Tabela 11.	63
Figura 40: Aspectos dimensionais da garganta do cordão de solda para testes in loco considerando cordão a5 nas posições 1F e 2F soldados após redefinição dos parâmetros de solda conforme Tabela 11.	63
Figura 41: Dimensional mostrando a penetração de raiz associada aos testes in loco para cordão a5 nas posições 1F e 2F soldados após redefinição dos parâmetros de solda conforme Tabela 11.	64
Figura 42: Dimensional dos raios de transição obtido nos testes in loco para cordão a5 nas posições 1F e 2F soldados após redefinição dos parâmetros de solda conforme Tabela 11.	64
Figura 43: Dimensionais de pernas obtidos em testes in loco para cordão a5 nas posições 1F e 2F soldados após redefinição dos parâmetros de solda conforme Tabela 11.	65
Figura 44: Comparação dos perfis de dureza Vickers (2,0kg) para as amostras soldadas com processo PMC e pulsado convencional - Segmentos 1, 2 e 3. .	66
Figura 45: Comparação dos perfis de dureza Vickers (2,0kg) para as amostras soldadas com processo PMC e pulsado convencional – Segmento 4.	66
Figura 46: Micrografias das amostras C (PMC) e D (convencional) retiradas do metal base - Aço ASTM A572 G50.	68
Figura 47: Micrografias das amostras C (PMC) e D (convencional) retiradas da ZAC da junta soldada.	69
Figura 48: Micrografias das amostras C (PMC) e D (convencional) retiradas da região do metal de solda da junta soldada.	70

SÍMBOLOS E ABREVIATURAS

1F	Posição plana de soldagem
2F	Posição horizontal de soldagem
a	Garganta de solda
ASTM	American Standard for Testing of Materials
AV	Agrega Valor
AWS	American Welding Society
C	Fatores Não Críticos
C*	Fatores críticos
CMT	Cold Metal Transfer
EPS	Especificação Procedimento de Soldagem
GF	Região grãos finos
GG	Região grãos grosseiros
GMAW	Gas Metal Arc Weld
HV	Dureza Vickers
IC	Região intercrítica
ISO	International Organization for Standardization
LSC	Low Spatter Control
MAG	Metal Active Gas
MIG	Metal Inert Gas
N	Ruído
NAV	Não Agrega Valor
PMC	Pulse Multi Control
SC	Região subcrítica
SIPOC-Y	Suppliers, Inputs, Process, Output, Customers, Variável resposta
SO	Operação padrão
UGPP	Uma gota por pulso
ZAC	Zona Afetada pelo Calor

1 INTRODUÇÃO

1.1 Enunciado do problema

Todo processo industrial envolve fluxos produtivos que evoluíram ao passar do tempo com a finalidade de buscar otimizações principalmente relacionadas a tempos de processo, *lead time* de entrega, qualidade, segurança e meio ambiente. Ao contrário do entendimento comum, a redução de tempos de processos não significa que pessoas e máquinas precisam trabalhar cada vez mais rápido, pois dessa forma é alcançado apenas cerca de 5% a 10% de ganho em troca de incentivos. Além disso, há um limite em que eles conseguem trabalhar de forma consistente, ultrapassar esse limite resulta em perda de repetibilidade, qualidade e segurança [1]. Por isso, a revisão de conceitos produtivos com a eliminação de desperdícios e desenvolvimento tecnológico são chave para o aumento da capacidade produtiva, eficiência e redução de custos em processos industriais.

O estudo de caso abordado nesse Mestrado envolve o processo produtivo de uma empresa, o qual conta com uma célula de soldagem robotizada que foi inserida no fluxo de produção de 4 peças diferentes. A automação do processo levou a resultados extraordinários com reduções de tempo de processo na ordem de 10%. Porém, a célula soldagem robotizada absorveu sozinha grande parcela da carga de trabalho e esse equipamento passou a ser um “gargalo” no fluxo de produção, como mostra a Figura 1, onde é possível observar diversos processos ocorrendo em paralelo e convergindo para um mesmo ponto, o robô.

Portanto, um novo desafio surgiu: reduzir tempos de produção das peças soldadas por esta célula de soldagem robotizada.

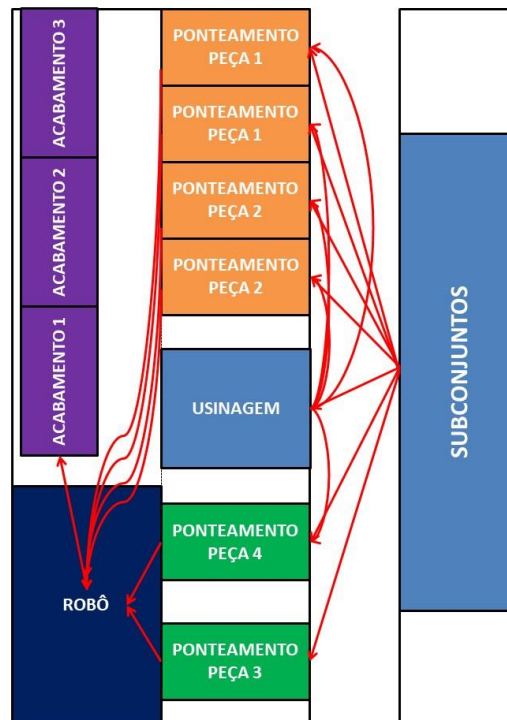


Figura 1: Representação esquemática mostrando robô de soldagem como “gargalo” de produção de uma determinada célula de soldagem

1.2 Motivação

A demanda dos mercados tem sido dividida entre um número crescente de indústrias em um mesmo segmento e, portanto, para se manter competitivo nessas situações é preciso ter foco em produtividade, sendo velocidade a palavra-chave. A célula de soldagem robotizada que é foco deste trabalho estava próxima ao limite de sua capacidade produtiva e a redução de tempos de processos é a forma mais direta de alcançar tal meta. Em processos de soldagem robotizados o tempo de ciclo é composto basicamente por duas parcelas:

- A. Tempo de arco aberto de solda.
- B. Tempo de movimentação em vazio do robô.

Para o caso das peças produzidas por essa célula considerada no presente trabalho de Mestrado, o tempo de movimentação em vazio, ou seja, tempo entre a execução dos cordões de solda, é a menor parcela do tempo total

de ciclo da peça e, portanto, é sensato que o foco seja o tempo de arco aberto, isto é, tempo em que o robô está executando de fato a soldagem, para que sejam alcançados resultados mais expressivos.

1.3 Objetivo

Este estudo tem como objetivo a otimização de tempos de ciclo no processo de soldagem robotizado GMAW – *Gas Metal Arc Welding* – de juntas em ângulo sem preparação do aço ASTM A572 G50 através da seleção de parâmetros que resultem em aumento da velocidade de deslocamento cumprindo todos os requisitos geométricos do cordão de solda e sem comprometimento da qualidade final desses cordões em termos de defeitos superficiais, propriedades mecânicas e microestrutura.

2 REVISÃO DA LITERATURA

2.1 Soldagem através do processo GMAW

Denomina-se soldagem o 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. Segundo Houldcroft, cada processo de soldagem deve preencher os seguintes requisitos [2]:

- 1) Gerar uma quantidade de energia capaz de unir dois materiais, similares ou não;
- 2) Remover as contaminações das superfícies a serem unidas;
- 3) Evitar que o ar atmosférico contamine a região durante a soldagem;
- 4) Propiciar o controle da transformação de fase, para que a solda alcance as propriedades desejadas, sejam elas físicas, químicas ou mecânicas.

Os processos GMAW, também conhecidos como MIG (*Metal Inert Gas*) e MAG (*Metal Active Gas*), utilizam como fonte de calor um arco elétrico mantido entre um eletrodo nu consumível, alimentado continuamente, e a peça a ser soldada. A proteção da região de soldagem é feita por um fluxo de gás inerte (MIG) ou ativo (MAG). A soldagem pode ser semiautomática ou automática [2]. Esse processo foi inventado nos Estados Unidos para soldagem de alumínio em 1949. Durante os anos de 1950 tornou-se popular para solda de aço carbono usando CO₂ ou mistura de argônio com CO₂ [3].

O equipamento principal é composto por uma máquina de soldagem, um alimentador de arame com um reservatório de metal de adição, uma tocha de soldagem e cilindros de gás de proteção, conforme mostrado na Figura 2. Já a Figura 3 mostra, esquematicamente, detalhes do metal sendo transferido onde o arco e a poça de fusão são protegidos contra oxidação sob o gás de proteção adicional [5].

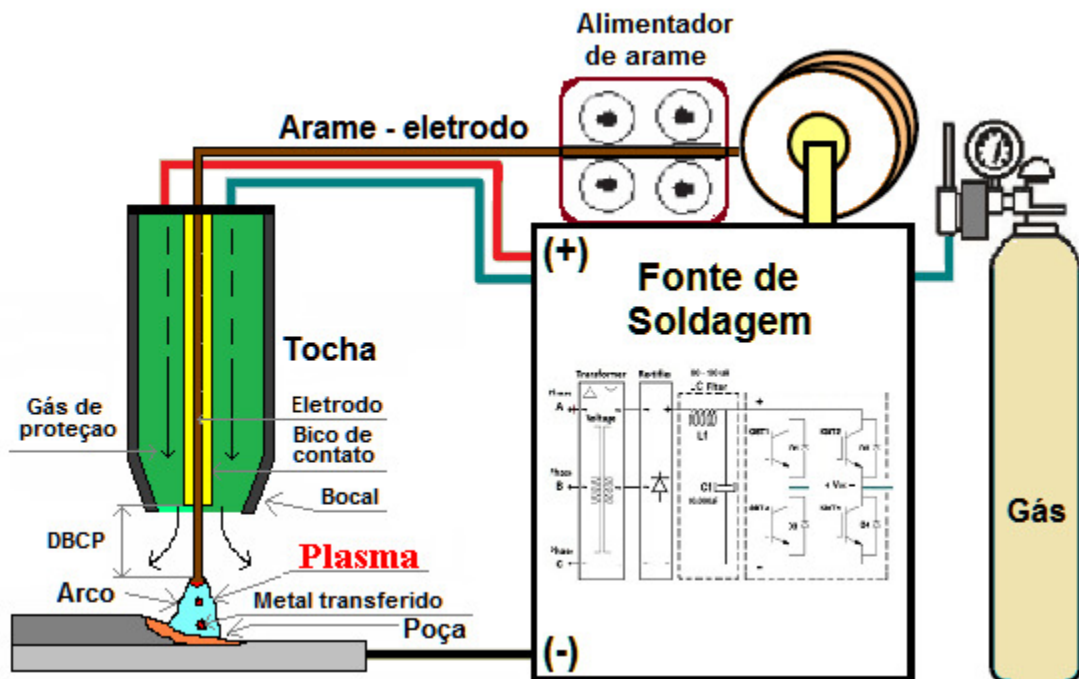


Figura 2: Equipamentos utilizados no processo MIG/MAG e ilustrações (arco, transferência metálica, poça de fusão, bico de contato, distância bico de contato - peça (DBCP) [4].

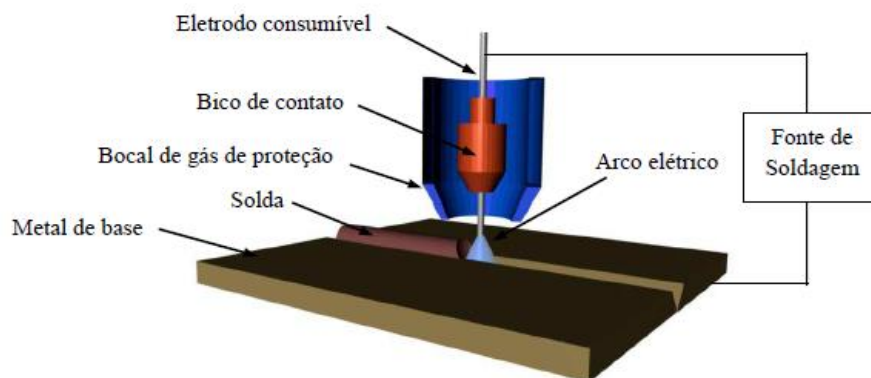


Figura 3: Representação esquemática do processo de soldagem através de operações MIG/MAG [5].

O processo MIG é adequado à soldagem de aços carbono, aços de baixa, média e alta liga, aços inoxidáveis, alumínio e ligas, magnésio e ligas e cobre e ligas. O processo MAG é utilizado na soldagem de aços baixo carbono e aços baixa liga [2].

Portanto, a soldagem de aços carbono baixa liga pode ser feita tanto com processo MIG quanto com processo MAG. A diferença entre os processos escolhidos irá influenciar, entre outros fatores, no modo de transferência do metal de adição, no formato do arco e do cordão, como mostra a Figura 4. O modo de transferência determina a forma com que o metal de adição fundido será depositado na poça de fusão.

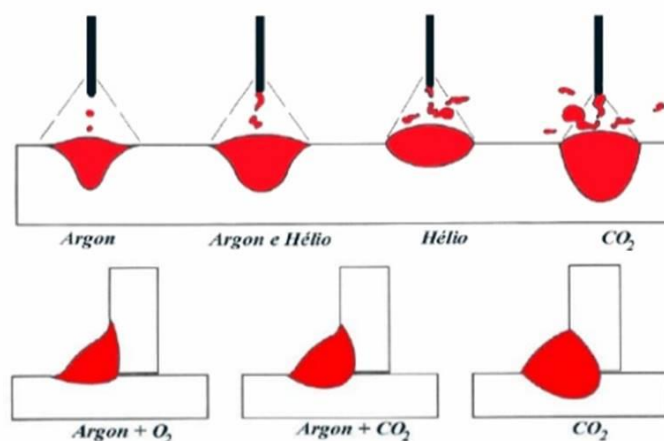


Figura 4: Representação esquemática dos efeitos decorrentes do tipo de gás no formato do cordão de solda [6].

O tipo de transferência metálica pode ser determinado pela geometria do eletrodo nu (diâmetro e comprimento), sua composição, tipo de gás de proteção, composição do revestimento do eletrodo, corrente e tensão.

Existem, basicamente, quatro tipos de transferência metálica no processo MIG/MAG: globular, curto-circuito, pulverização axial e rotacional, e arco pulsado [2].

- 1) Transferência globular: ocorre para baixas densidades de corrente e qualquer tipo de gás de proteção, especialmente para CO_2 e Hélio. A gota que se forma na ponta do eletrodo nu tem o diâmetro maior que ele, daí resultando a dificuldade em soldar fora de posição. A quantidade de calor colocada na poça a ser soldada tem um valor intermediário, comparado com outros modos de transferência. Esse tipo de transferência pode gerar falta de

penetração, falta de fusão e/ou reforço excessivo do cordão de solda.

- 2) Transferência por curto-circuito: ocorre para eletrodos nus de diâmetros menores que os convencionais (0,8 a 1,2 mm), para valores mais baixos de corrente que a transferência globular e para qualquer tipo de gás de proteção. A gota que se forma na ponta do eletrodo nu toca a poça de fusão, formando um curto-circuito. A gota é puxada para a poça de fusão pela tensão superficial desta e, por isso, esse modo de transferência é adequado para todas as posições. A quantidade de calor colocada na peça é bem menor que a da transferência globular, sendo assim recomendada para soldar chapas finas. A penetração não é muito grande e existe problema de respingo e instabilidade do arco.
- 3) Transferência por pulverização: ocorre para elevadas densidades de corrente e quando se usa argônio ou misturas ricas em argônio com gás de proteção. A gota que se forma na ponta do eletrodo nu tem diâmetro menor que o próprio eletrodo e é axialmente direcionada. A quantidade de calor colocada na peça para solda é bastante elevada, sendo esse modo de transferência adequado para soldar chapas grossas. No caso de soldagem de aço carbono, solda-se nas posições 1F (plana) e 2F (Horizontal) de juntas em ângulo. A penetração é bem elevada e o arco bastante suave. Para um dado diâmetro de arame, o tipo de transferência metálica muda de globular para pulverização axial, à medida que se aumenta a corrente. Essa corrente dá-se o nome de corrente de transição globular/pulverização. Existe ainda uma segunda corrente de transição, na qual a transferência metálica passa de pulverização axial para pulverização rotacional. Nesse modo de transferência, a ponta do eletrodo nu faz um movimento circular em torno de seu eixo, tornando a transferência bastante instável.
- 4) Transferência por arco pulsado: a transferência é do tipo pulverização axial. O equipamento de soldagem gera dois níveis

de corrente. No primeiro nível a corrente base é tão baixa que não há transferência, mas somente início da fusão do arame. No segundo nível, a corrente de pico é superior à corrente de transição globular/pulverização, ocasionando a transferência de uma única gota. Com isso, consegue-se uma transferência com características de pulverização, porém com uma corrente média bem menor. A quantidade de calor colocada na peça é menor que a da pulverização axial convencional; por isso, solda-se espessuras bem menores e consegue-se soldar em todas as posições.

Em conclusão, observa-se que o tipo de transferência metálica é função da corrente de soldagem, da bitola, e da composição do eletrodo nu e da composição do gás de proteção, entre outros parâmetros. A transferência por pulverização axial é a mais indicada, por ter um arco estável e alta taxa de deposição, desde que respeitadas suas limitações. A transferência globular gera bastante respingos, sendo pouco utilizada. No seu lugar diminui-se a distância do arco e obtém-se a transferência por pulverização axial no que se refere à posição de soldagem e espessura de chapa [2].

A Figura 5 ilustra o tipo de transferência de acordo com a tensão e a corrente.

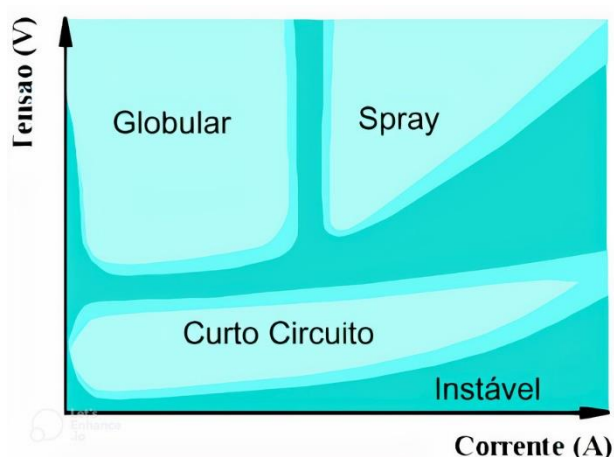


Figura 5: Influência da tensão e da corrente de soldagem no modo de transferência metálica [7].

2.2 Soldagem robotizada

A palavra “robótica” é oriunda do idioma tcheco e na sua tradução mais simples quer dizer trabalho forçado; foi utilizada pela primeira vez em 1954 por Isaac Asimov, em um livro de ficção científica, embora o termo genérico *robot* tenha sido empregado antes, em 1917, por Karen Capek, associado à figura de um humanoide.

O desenvolvimento do primeiro robô data de 1958, realizado pelos Estados Unidos, e em 1962 era comercializado. Os robôs industriais aplicados à soldagem tiveram início na década de 1960 na indústria automobilística e eram utilizados na soldagem por resistência; na soldagem a arco elétrico a robotização teve crescimento maior a partir da evolução das máquinas de soldagem, dotadas também de microprocessadores que permitem respostas rápidas a condições de soldagem como corrente e tensão, estabilidade de arco, controle de falha de arco e de tocha na peça [8].

Células de soldagem robotizadas para aplicações industriais são normalmente compostas por um posicionador, como exemplificado na Figura 6, que irá movimentar a peça a ser soldada buscando deixar a junta a ser soldada nas posições que proporcionam maior taxa de deposição, ou seja, quantidade de material depositado por unidade de tempo. Essas posições são em primeiro lugar 1F, ou plana, seguida pela 2F, ou horizontal [2].

Segundo AWS A3.0 a posição de soldagem é a forma em que a junta é posicionada para execução da soldagem sejam de chapas ou tubos. Como as juntas estudadas nessa proposta são chapas, logo posição 1F corresponde a soldas aplicadas em uma junta na qual o cordão de solda é aplicado na posição plana enquanto 2F na posição horizontal. A Figura 7 mostra essas posições de soldagem [9].



Figura 6: Exemplo de um posicionador de soldagem [10].

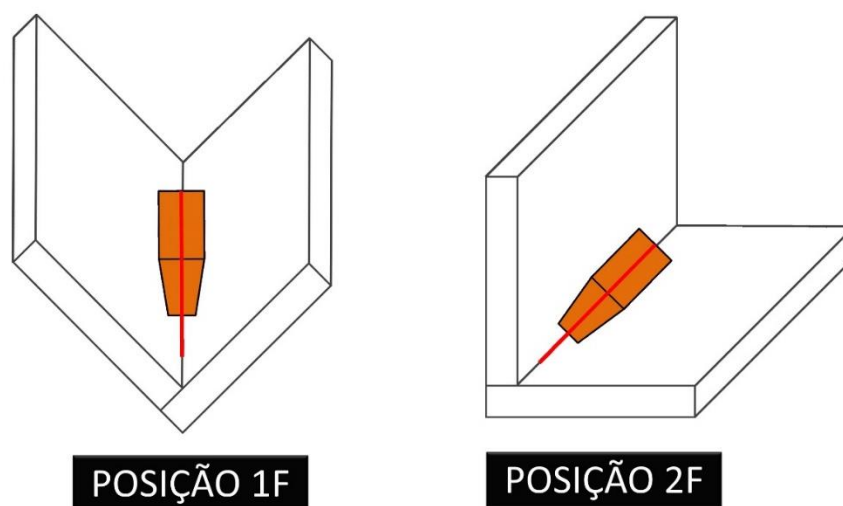


Figura 7: Ilustração das posições de soldagem 1F e 2F para juntas de ângulo.

As células de soldagem robotizadas contam ainda, além do posicionador, com obviamente braço robótico, que será responsável pela manipulação da

tocha de soldagem, e máquina de solda [8]. A Figura 8 mostra principais componentes de uma célula soldagem roborizada.

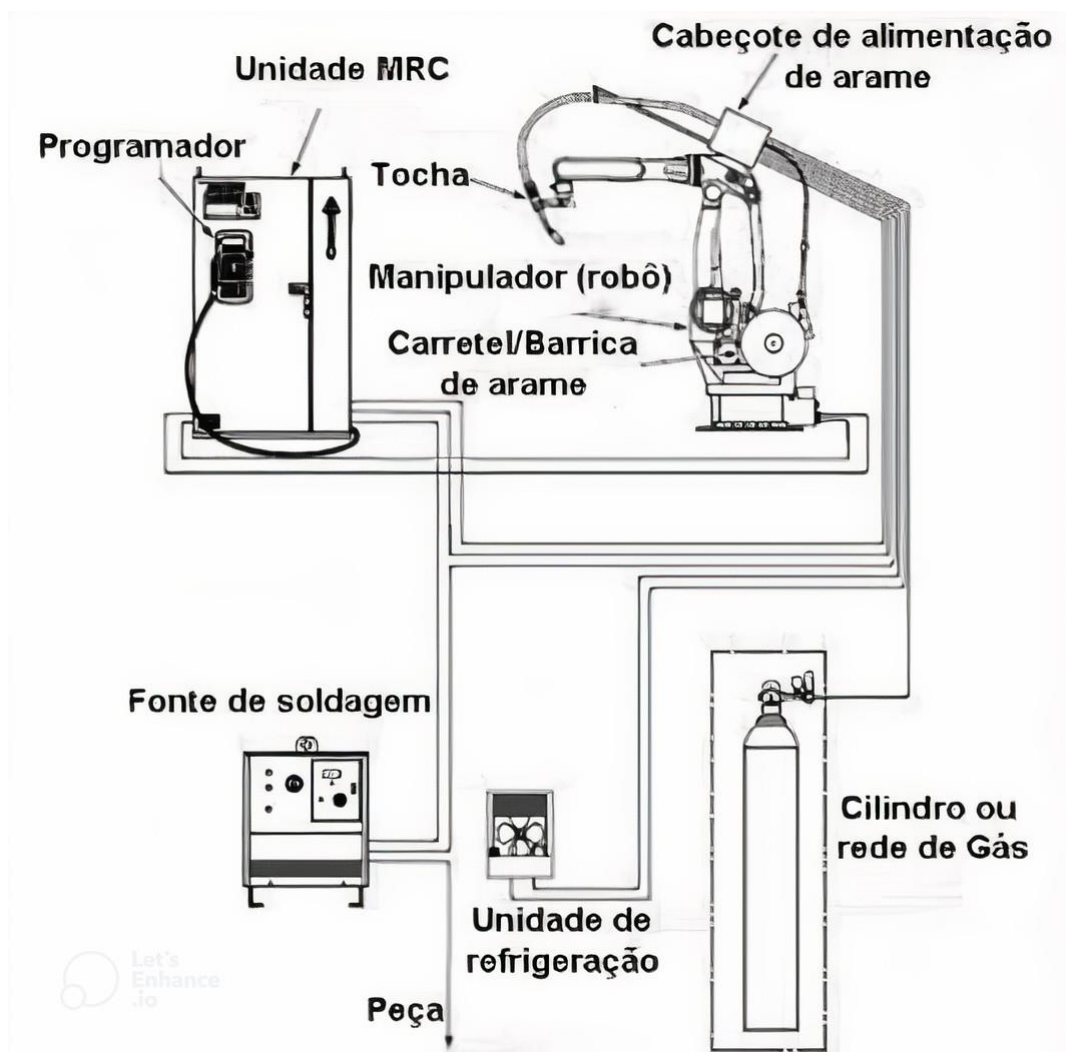


Figura 8: Representação esquemática de parte dos componentes de uma célula de soldagem robotizada [11].

2.3 Transferência metálica por arco pulsado e soldagem MIG/MAG pulsado sinérgico

Tradicionalmente, o processo MIG/MAG é operado quase que exclusivamente com o eletrodo em polaridade positiva, garantindo assim a estabilidade do arco. Atualmente, algumas técnicas estão sendo adotadas para

proporcionar alta taxa de deposição com menor distorção e penetração, dentre as quais é possível destacar a utilização de corrente pulsada [12] [13].

O processo MIG/MAG em corrente pulsada vem ganhando cada vez mais espaço dentro da soldagem por superar suas limitações quanto ao controle da transferência metálica. Por outro lado, juntamente com as vantagens deste processo, vieram as dificuldades devido à grande complexidade em ajustar todas as variáveis do processo que, de uma forma geral, são interdependentes. A correta seleção destas variáveis deve respeitar duas premissas importantes. A primeira premissa se deve ao fato da estabilidade do arco demandar uma única gota se transferindo ao fim de cada pulso, também conhecida como UGPP (uma gota por pulso) e a outra premissa citada na literatura se refere à necessidade da gota possuir o diâmetro igual ao do eletrodo, ou o diâmetro da gota, representado por seu volume, pode variar dentro de uma determinada faixa [12] [13].

Na Figura 9 é mostrada a forma de onda teórica do processo e as fases de um ciclo completo do destacamento da gota. Fase 1) a corrente de base serve principalmente para manter o arco aberto e pré-aquecer o material de base e do eletrodo; fase 2) a subida da corrente para o nível de corrente de pulso; fase 3) o estrangulamento do material fundido na ponta de eletrodo; fase 4) a descida da corrente e separação da gota do eletrodo; e fase 5) a gota foi transferida para a poça de fusão [12] [13].

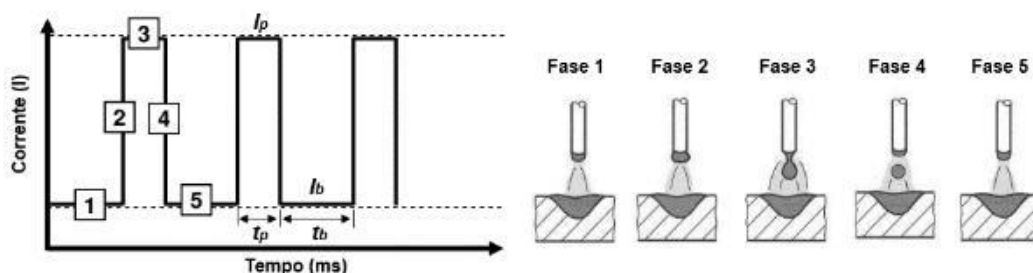


Figura 9: Influência da corrente de soldagem no modo de transferência metálica [12].

Para que o processo opere em condições de estabilidade do arco, todos os parâmetros devem ser ajustados em uma combinação ótima considerando

cada condição de soldagem (metal base, diâmetro e material do arame eletrodo, tipo do gás de proteção etc.) [6] [13]

Em decorrência da necessidade desses diversos ajustes, o modo de transferência pulsado é comumente operado por máquinas de soldagem sinérgicas nas quais, baseadas no tipo de material a ser soldado, gás de proteção e eletrodo consumível, selecionam curvas sinérgicas específicas capazes de controlar tensão e corrente automaticamente. A alternância de valores de corrente, conforme Figura 9, é proporcionada por fontes de energia especiais, com parâmetros de pulso controláveis. Máquinas de solda controladas por computador trazem as condições de pulso pré-programadas; este tipo de controle é conhecido como sinérgico. O controle sinérgico é um sistema que permite o ajuste do parâmetro de pico de corrente, de modo que as condições de equilíbrio sejam mantidas dentro de uma larga escala de velocidades de alimentação. O sistema pode ser acrescido de um tacômetro para medir a velocidade de alimentação; este dado é inserido no sistema, que gera automaticamente a frequência de controle sinérgico [8] [13]

2.4 Processo soldagem PMC – *Pulse Multi Control*

A constante evolução da tecnologia com hardwares e softwares mais velozes e precisos permite que processos já existentes sejam aperfeiçoados. O Processo PMC é uma evolução do processo pulsado convencional. A Figura 10 mostra formato de onda de um processo pulsado sinérgico convencional [14] [15].

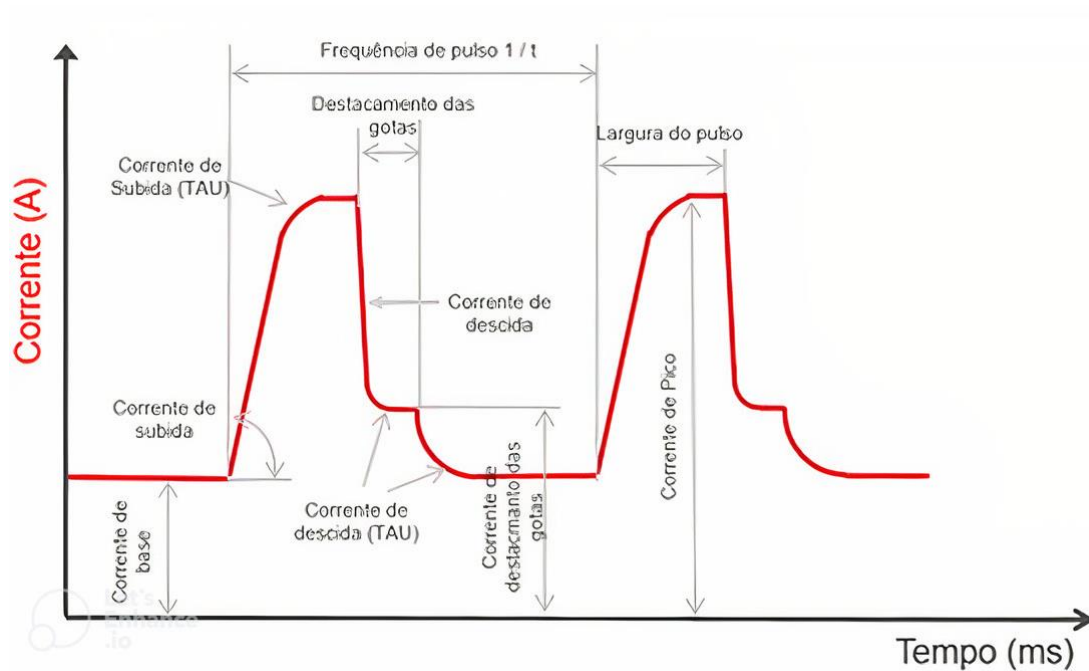


Figura 10: Formato de onda associado a um processo pulsado sinérgico [14] [15].

Observa-se que, de forma semelhante à Figura 9, estabelecem-se uma corrente de base e uma corrente de pico, porém percebe-se que a onda não é perfeitamente quadrada, ou seja, a corrente aumenta de forma mais branda. Após, a corrente de pico a corrente cai rapidamente onde se dará o início do destacamento da gota até atingir um patamar, pouco acima da corrente de base, em que a gota efetivamente se destaca do eletrodo. A Figura 11 mostra *frames* de uma filmagem em alta velocidade representando cada uma dessas etapas [14] [15].

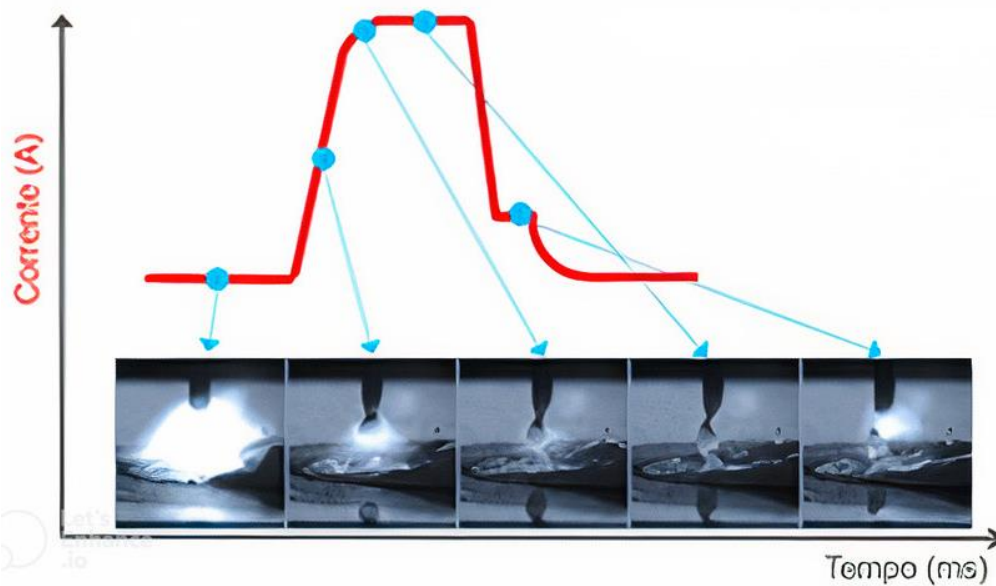


Figura 11: Etapas de formação e destacamento de gota no modo de transferência metálica pulsado [14] [15].

Percebe-se que na corrente de base o arco elétrico está apenas aberto, esquentando o eletrodo, mas sem a formação de nenhuma gota. Conforme a corrente sobe, a gota começa a formar-se até atingir a corrente de pico onde seu tamanho começa a viabilizar o início do destacamento. A corrente começa então a cair até o ponto em que se mantém brevemente constante onde a gota é efetivamente destacada do eletrodo.

Nesse processo, porém, não se tem o controle preciso do momento exato em que a gota será destacada e isso poderá acarretar defeitos de soldagem, como mordeduras e falta de preenchimento, conforme a velocidade de deslocamento da soldagem é aumentada. Para contornar isso, a tecnologia PMC adiciona curtos-circuitos controlados para controlar e forçar o destacamento da gota. As imagens na parte de baixo do gráfico na Figura 12 mostram as etapas de formação e destacamento das gotas no processo PMC [14] [15].

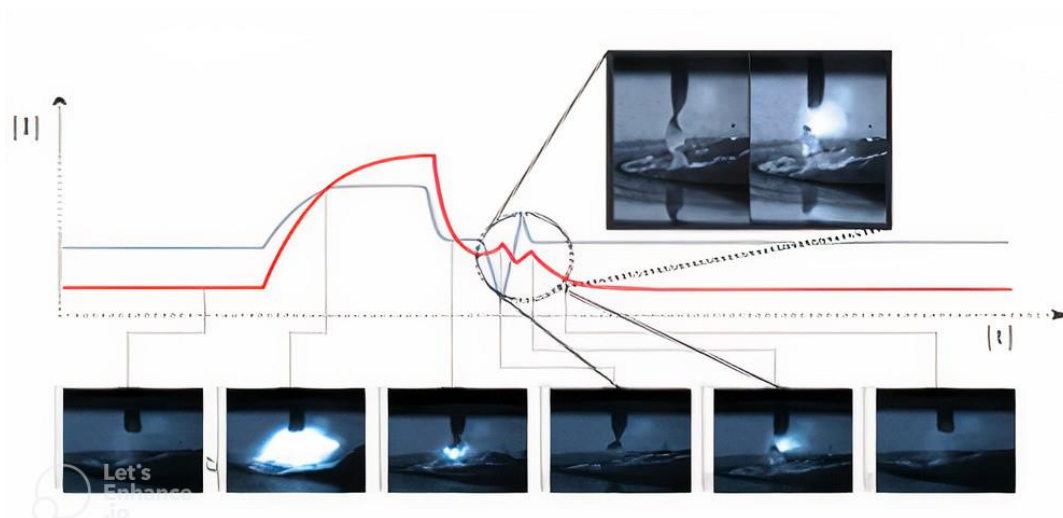


Figura 12: Etapas de formação e destacamento de gota no modo de transferência metálica pulsado com uso do processo PMC [14] [15].

Ainda na Figura 12 as duas imagens destacadas na parte superior direita mostram o momento do destacamento da gota no processo pulsado convencional enquanto as imagens correspondentes abaixo são do processo PMC. Comparando ambas é possível perceber que a adição dos curtos-circuitos proporciona maior estabilidade ao arco elétrico, permitindo assim melhores resultados de penetração e principalmente maiores velocidades de soldagem, uma vez que com as informações desses curto circuitos a máquina de soldagem consegue identificar a posição exata da ponta do arame, fazendo assim ajustes finos nos parâmetros de solda evitando assim os defeitos que surgiriam no processo pulsado convencional [14][15].

2.5 Características do aço ASTM A572 G50

A soldagem é o principal método de união do aço. Deste ponto de vista, a soldagem é tão importante para um fabricante quanto processos de corte a oxigênio, conformação e usinagem. No entanto, a soldagem ganhou esse destaque apenas no início da Segunda Guerra Mundial, quando um maior reconhecimento foi dado ao desenvolvimento de aços especificamente para fabricação soldada, na substituição de outros aços tipicamente empregados em outros métodos, como rebiteamento e aparafusamento. Como consequência, os

produtores de aço, fabricantes de eletrodos e empresas de equipamentos de soldagem trabalharam intensamente para desenvolver aços adequados, metais de solda e procedimentos de soldagem [3].

O aumento da resistência mecânica de aços é tipicamente realizado através da adição de carbono, o que resulta em um aumento da fração de perlita na microestrutura e conseqüente incremento na resistência. Porém o aumento do teor de carbono em aços não é recomendável para aplicações em soldagem, uma vez que os resultados de dureza e soldabilidade seriam insatisfatórios [3]

Nas últimas décadas, os aços de alta resistência e baixa liga (ARBL) passaram por grandes desenvolvimentos tecnológicos baseados principalmente na compreensão da correlação entre propriedades e microestrutura. De um modo geral, o principal elemento de liga dos aços é o carbono, resultando em materiais de baixo custo, porém com tenacidade e soldabilidade reduzidas. No entanto, com o objetivo de melhorar-se a soldabilidade e manter-se a resistência, foi reduzido o teor de carbono e aumentado o teor de manganês. Porém continuava-se a serem observadas falhas catastróficas de estruturas soldadas, e assim, através de estudos, entendeu-se que através da redução e controle do tamanho de grão permitem aumentar a resistência e a tenacidade sem comprometer a soldabilidade e permitindo redução do teor de carbono. São necessários tratamentos termomecânicos a temperaturas inferiores à de recristalização e com graus significativos de deformações para se obter austenita de grão refinado para assim favorecer a nucleação de ferrita durante o resfriamento, resultando em microestruturas de extremamente refinadas. Porém são é preciso utilizar laminadores de alta potência uma vez que a temperatura de recristalização de aços contendo manganês é baixa. Outra opção é aumentar a temperatura de recristalização através do uso de microligantes que irão retardar o crescimento de grão austenítico [16].

O aço ASTM A572 G50 é classificado como aço tipo do tipo ARBL, sendo comumente utilizado em soldagem estrutural de equipamentos. A microestrutura desse tipo de aço, laminados à quente e sem tratamento térmico posterior, é formada por ferrita e perlita e possui limite de escoamento entre 207 e 345MPa.

A Tabela 5 mostra a composição química desse aço, onde pode-se notar teor considerável de manganês.

Tabela 1: Composição química do aço ASTM A572 Gr50 [17].

Elemento	C	Si	Mn	P	S	Cr	Ni	Cu	Nb	V	Ceq
%p	0,13	0,24	1,29	0,02	0,0008	0,007	0,012	0,007	0,028	0,003	0381

Existem três fatores importantes para a continuação da evolução dos aços ARBL [16]:

- 1) Desenvolvimento de mecanismos para refino de grão, resultando em aumento de tenacidade e limite de escoamento;
- 2) Melhoria da soldabilidade por meio da redução do carbono equivalente, reduzindo a tendência de formação da martensita e pelo controle da evolução da microestrutura da zona afetada pelo calor através do controle do teor de elementos de ligas, carbono e nitrogênio presentes;
- 3) Melhoria da tenacidade e da formabilidade, além de buscar isotropia da ductilidade.

2.6 Qualidade de juntas soldadas

Qualidade em soldagem, como qualidade em geral, é normalmente feita através de comparações em uma escala de melhor ou pior. Isso pode funcionar quando é preciso escolher entre alternativas, mas determinar a qualidade da solda em um único produto ou um único cordão de solda é muito mais difícil. A razão disso é que nesse caso é preciso ter definições claras e objetivas, o que em geral não existem [18].

A qualidade da solda quantifica a capacidade das juntas soldadas de realizar os requisitos funcionais da solda durante o a vida em serviço da estrutura. Isso pode ser durabilidade em carga estática e/ou dinâmica, resistência à corrosão, aparência, ou qualquer outra função mecânica. Qualidade insuficiente devem ser evitados devido às profundas consequências na segurança e custo, ou seja, a falha ocorre em um estágio inicial. Qualidade

excessiva em por outro lado, pode resultar em aumento do custo de fabricação que não agrega mais valor ao cliente e ao produto. Isso é também necessário ao engenheiro de projeto para especificar a qualidade suficiente nos locais relevantes da estrutura, como vários locais na estrutura podem sofrer um aumento de carga devido a elevadores de tensão, como reforços, furos e entalhes [19].

Uma fabricação eficiente de estruturas soldadas requer um sistema de qualidade para trabalhar. Isso deve apoiar as melhores práticas e fornecer vida em fadiga prevista como propriedades das estruturas. Os requisitos de solda são os fatores mais importantes no sistema de qualidade que determina tanto o custo de fabricação quanto a vida em fadiga [19].

2.6.1 Geometria juntas soldadas

Dentro desses requisitos a geometria requerida do cordão de solda é de muita importância e sua especificação é dada pela simbologia apresentada no desenho de solda. Simbologia de soldagem consiste na representação gráfica das informações que são necessárias ao desenvolvimento do trabalho dos profissionais da área de soldagem [8].

Conforme norma ISO 2553 [20], garganta de solda corresponde à altura do triângulo do cordão de solda na seção transversal em uma junta do tipo ângulo, que é formada quando a seção transversal dos seus componentes (metal base) se apresentam sob a forma de um ângulo. No caso específico de juntas de ângulo as chapas do metal base são posicionadas a 90°. Outra dimensão importante é perna de solda que consiste na distância da interseção real ou projetada das faces de fusão e a ponta de uma solda de filete, medida através da face de fusão. A Figura 13 ilustra a definição de garganta e perna aplicada em uma junta de ângulo.

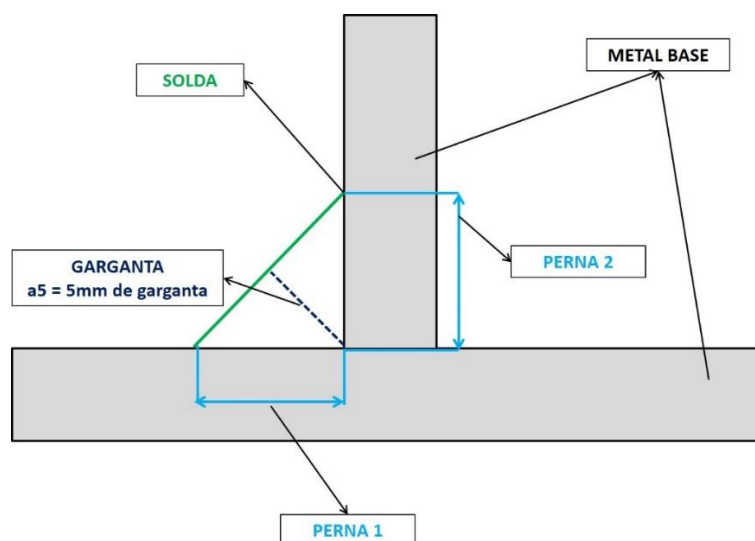


Figura 13: Ilustração das definições de garganta e perna de solda em uma junta de ângulo.

A medição dessas características é normalmente feita com auxílio de um calibre manual.

Além desses a penetração de raiz e raio de transição são outras dimensões importantes e especificadas em simbologias de solda que visam otimizar a estrutura e vida em fadiga da peça. A penetração de raiz para uma junta de ângulo consiste na medida da profundidade de penetração na interface entre as chapas medida a partir da face de uma delas. Raio de transição, por sua vez, são os raios formados entre o metal base e o cordão de solda [21]. A Figura 14 ilustra essas definições.

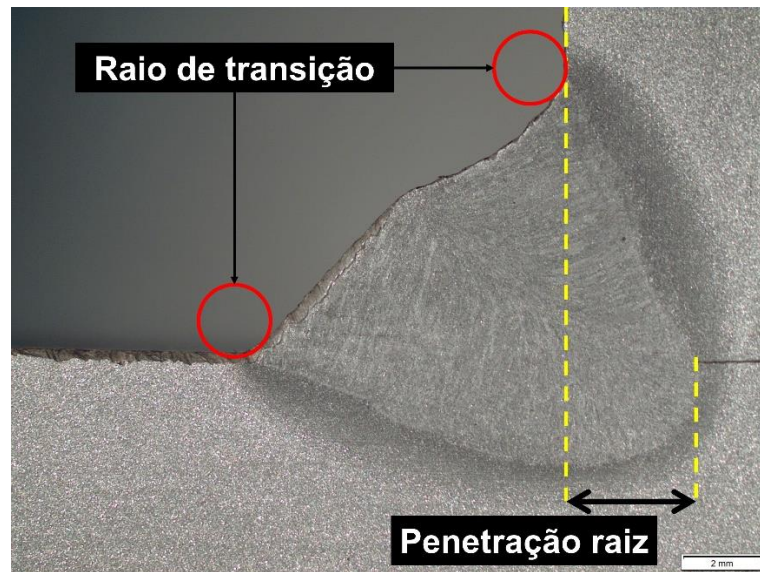


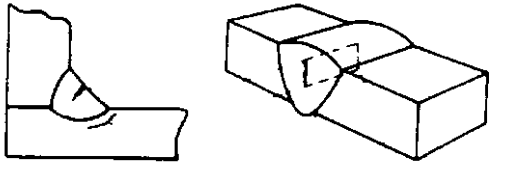
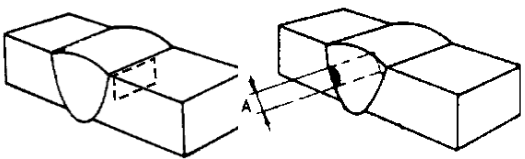
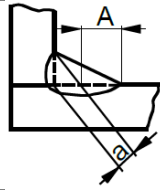
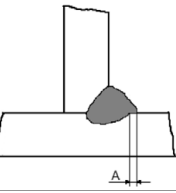
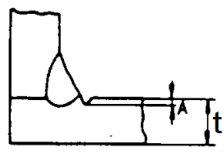
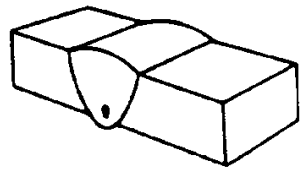
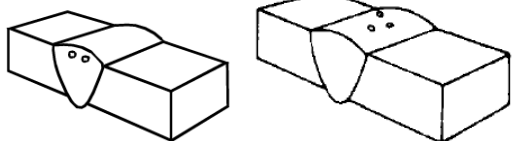
Figura 14: Definição penetração de raiz e raio de transição.

Raio de transição em uma junta soldada é, de forma geral, um importante fator para aumento da vida em fadiga em uma estrutura soldada [21]. Seu dimensionamento pode também ser feito com auxílio de calibre ou atualmente com equipamentos que fazem uma varredura da superfície do cordão de solda, normalmente utilizando feixes de laser, e assim criam um mapa de toda a extensão do cordão [19].

2.6.2 Defeitos dos cordões solda

Além dos requisitos dimensionais, existem diversos outros que não podem existir ou possuem determinada tolerância de acordo com projeto e norma sendo seguidos. A Tabela 2 mostra os principais defeitos normalmente encontrados em soldagem [22].

Tabela 2: Defeitos de soldagem.

Defeito	Ilustração
Trinca interna ou externa	
Falta de fusão	
Desvio de perna	
Sobreposição	
Mordedura	
Inclusão de escória	
Porosidade interna ou externa	

Importante notar que, apesar de haver especificações tolerando em determinada faixa ou não a existência desses e outros defeitos, neste trabalho foi considerado como não permitido qualquer um desses defeitos, exceto pelo desvio de perna, uma vez que é virtualmente impossível obter-se pernas com dimensões idênticas, desde que satisfazendo a condição de que o desvio fosse

menor ou igual a dois milímetros somados a 20% do valor da garganta de solda conforme especificado em [22].

2.6.3 Estrutura e propriedades

O processo de soldagem inerentemente expõe o aço a elevadas temperaturas, modificando estas microestruturas e consequentemente as propriedades mecânicas. A região imediatamente adjacente à solda, onde temperaturas se aproximam do ponto de fusão, podem ser significativamente degradadas pelo aumento do tamanho de grão que ocorre na região de fase austenita. Embora vários parâmetros controlem a microestrutura e as propriedades mecânicas da zona afetada pelo calor, ZAC, o controle do tamanho de grão da austenita é crítico para o desempenho de aços de alta resistência [23].

A velocidade de resfriamento depende primordialmente do aporte de energia e, portanto, indiretamente da velocidade do eletrodo e da temperatura inicial (preaquecimento da junta). A Figura 15 mostra como pode ser exercido o controle sobre a velocidade de resfriamento de uma junta soldada de aço estrutura, atuando sobre o aporte de energia e o preaquecimento. No caso (a) a junta foi preaquecida e a soldagem executada sem alterar o aporte de energia e a velocidade do eletrodo. No caso (b), a junta foi preaquecida e a soldagem executada diminuindo-se o aporte de energia, porém conservando-se a velocidade do eletrodo; há nesse caso uma sensível diminuição da velocidade de resfriamento, sendo este o controle mais efetivo. O caso (c) mostra uma junta soldada preaquecida, executada com o mesmo aporte de energia, mas aumentando-se a velocidade de soldagem e, consequentemente, o aumento da velocidade de resfriamento, o que pode não ser conveniente a depender do material em processamento [2].

Portanto, o aumento da velocidade de soldagem é desejado para aumento da capacidade produtiva em processos industriais, mas é necessária cautela para evitar formações de estruturas que possam prejudicar as propriedades mecânicas do componente soldado.

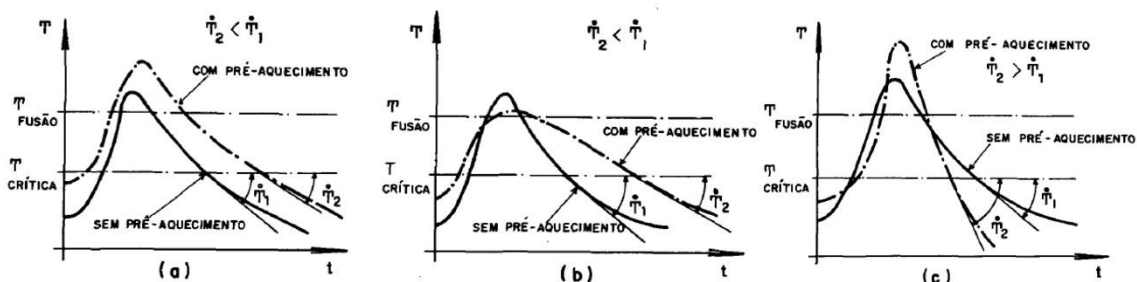


Figura 15: Efeito do preaquecimento no ciclo de solda em juntas de aço.

Considerando isso a medição da dureza é uma forma prática de se avaliar as propriedades da junta soldada em diferentes pontos do metal base, ZAC e metal de adição.

Os ensaios de dureza são realizados com maior frequência que qualquer outro ensaio mecânico, por diversas razões:

- A. Eles são simples e baratos – ordinariamente, nenhum corpo de provas especial precisa ser preparado e os equipamentos são relativamente baratos.
- B. O ensaio é não destrutivo – o corpo de provas não é fraturado e nem, tampouco, é excessivamente deformado; uma pequena impressão é a única deformação.
- C. Com frequência, outras propriedades mecânicas podem ser estimadas a partir dos dados de dureza, tal como o limite de resistência à tração.

Tanto o limite de resistência à tração quanto a dureza são indicadores da resistência de um metal à deformação plástica. Conseqüentemente, eles são aproximadamente proporcionais como mostra o exemplo da Figura 16 [24].

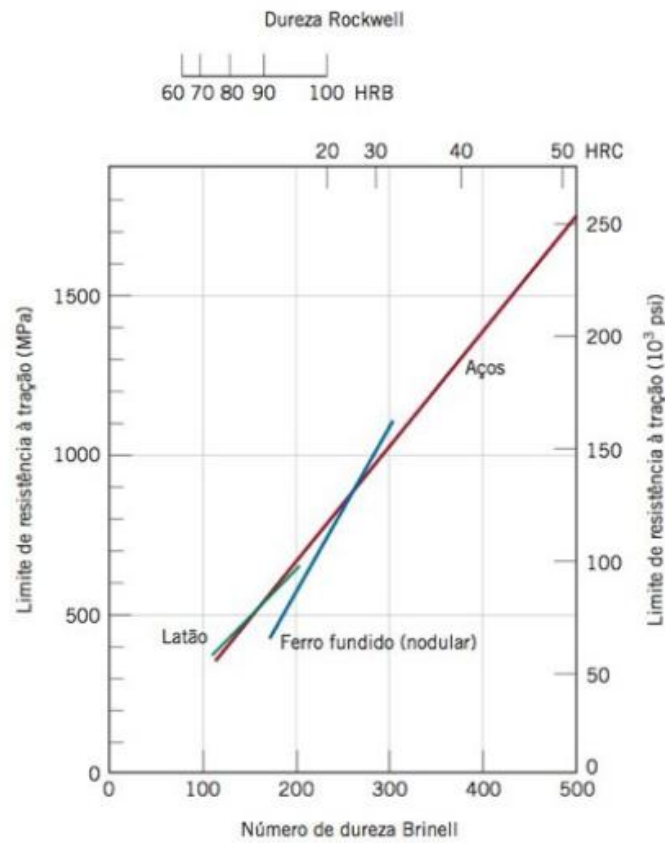


Figura 16: Relações entre a dureza e o limite de resistência a tração para o aço, latão e ferro fundido [24].

Dada as diversas estruturas presentes ao longo das regiões em uma junta soldada a avaliação de dureza é feita através de um perfil de dureza. No presente trabalho, foram estabelecidos perfis de microdureza contemplando as regiões do metal base, ZAC e metal de adição, conforme previsto nas normas ISO 9015-1 e ISO 9015-2 [25] [26]

A microestrutura de uma junta soldada de um aço de alta resistência e baixa liga (ARBL), por exemplo, deve ser tal que apresente propriedades similares a do metal base. Isso significa que a zona fundida e a zona afetada pelo calor (ZAC) devem ter propriedades similares a uma chapa que sofreu um tratamento termomecânico apropriado para desenvolver as propriedades mecânicas desejadas [2].

As imagens abaixo mostram microestruturas típicas do metal base ASTM A572 G50, Figura 17, além das regiões de grãos grosseiros (GG), grãos finos

(GF), intercrítica (IC) e subcrítica (SC) da ZAC, como visto na Figura 18, e do metal de solda, Figura 19, de um processo de solda Tandem utilizando corrente pulsada convencional, e os mesmos consumíveis, ou seja, arame ER70S-6 e gás mistura 82% Ar e 18%CO₂.

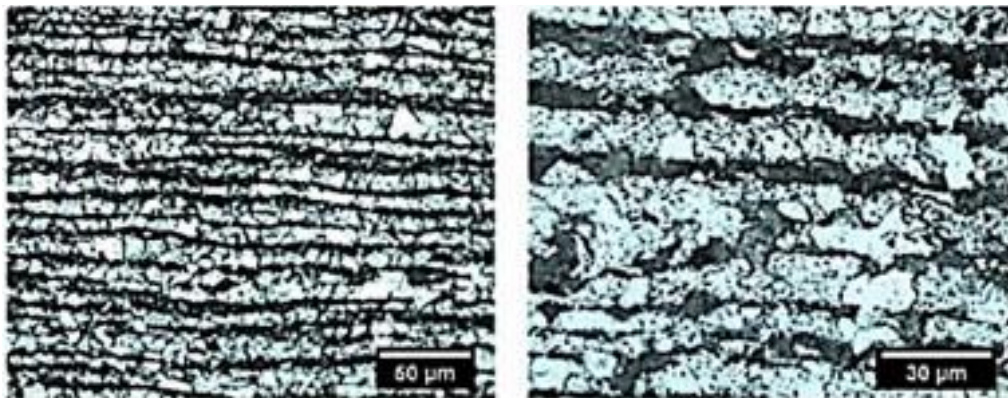


Figura 17: Micrografias óptica do aço ASTM A572 G50 [27].

A micrografia do metal de base ASTM A572 G50 composta de ferrita e perlita. Linhas de deformação típicas de chapas laminadas caracterizam as microestruturas com prevalência de ferrita [27]

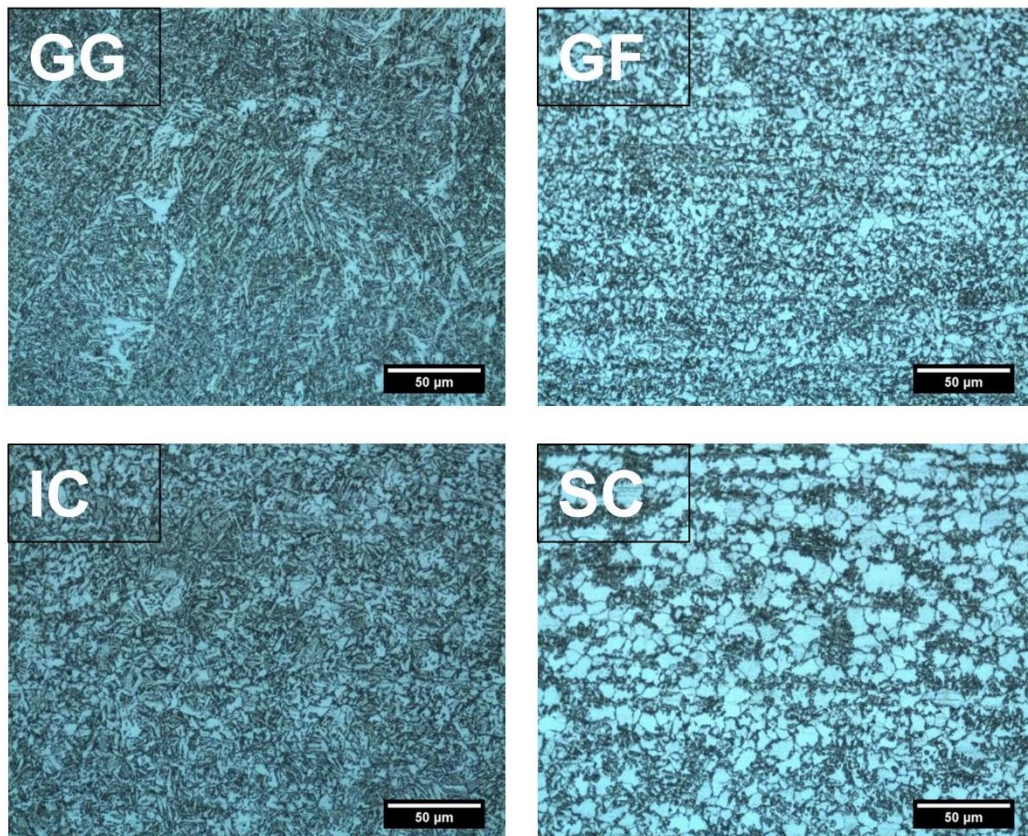


Figura 18: Micrografias óticas das regiões de grãos grosseiros (GG), grãos finos (GF), intercrítica (IC) e subcrítica (SC) da zona afetada pelo calor (ZAC) do aço ASTM A572 G50 [27].

As regiões intercrítica (IC) e subcrítica (SC) apresentaram a microestrutura do metal de base parcialmente alterada, sendo constituídas majoritariamente de ferrita e perlita. Na região de grãos grosseiros da ZAC (GG) é constituída basicamente por ferrita acicular (FA) bastante refinada contendo alguns poucos grãos de ferrita poligonal (FP) [27].

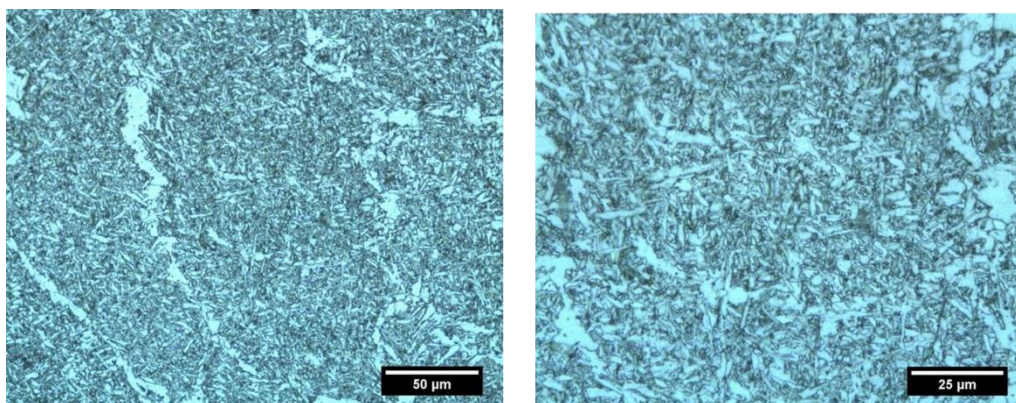


Figura 19: Micrografia metal de solda do aço ASTM A572 G50 [27].

Na região do metal de solda é possível observar a presença de ferrita na forma acicular alinhada de acordo com o crescimento epitaxial com predomínio da formação de ferrita primária e de agregados ferrita-carbonetos [28].

2.7 Métodos de análise do processo – SIPOC-Y e Mapa de processo

A análise SIPOC – Y faz parte da filosofia Lean Six Sigma e tem origem nos termos em inglês: *Suppliers* (fornecedores); *Inputs* (insumos), *Process* (processo), *Outputs* (Produtos obtidos na saída) e *Customers* (consumidores). Esta técnica tem como objetivo melhorar a visualização da sequência de processos por todos os envolvidos diretamente a este [29].

Para a elaboração da matriz SIPOC devem ser seguidos os seguintes passos:

- A. Criar um nome para o processo;
- B. Criar uma área onde a equipe do projeto possa adicionar informações a Matriz SIPOC;
- C. Definir os subprocessos que fazem parte do processo mapeado;
- D. Identificar as Saídas;
- E. Identificar os Clientes;
- F. Identificar as Entradas;
- G. Identificar os Fornecedores;

H. Validar o processo com o patrocinador e outros *stakeholders* envolvidos no projeto.

Além disso, há alguns elementos que podem ser adicionados a um SIPOC para deixá-lo ainda mais útil:

- A. Declaração de propósito para o processo;
- B. Responsável ou dono do processo;
- C. Definir o início e o fim do processo;
- D. Defina as fronteiras do processo.

A declaração de propósito irá definir a utilidade do processo de acordo com o determinado pelo cliente, para assim poder contratar os profissionais certos para organização, com as habilidades corretas e no tempo adequado. O propósito definirá o benefício do processo para a empresa. O responsável pelo processo é a pessoa que deverá se envolver em todas as atividades de melhoria ou definição do processo. O início e fim do processo serão os pontos de início e fim do fluxograma dele. As fronteiras do processo irão definir se será necessário mais de um mapa de processo ou se todas as atividades poderão entrar em apenas um [30].

Através de um mapa de processos é possível identificar o fluxo de uma determinada parte do processo, deixando claros quais são suas etapas, os objetivos ou resultados esperados de cada etapa, identificados pela letra “y”. Além disso também se deixa claro os fatores ou variáveis que compõem cada etapa, chamados de “x”, e divididos em:

- A. Fatores críticos (C*): fatores que são controláveis e sua alteração terá impacto no(s) ‘y’s’ de cada etapa e conseqüentemente no(s) ‘Y’s’ que são os objetivos do projeto. Correspondem aos fatores que serão considerados na presente proposta.
- B. Fatores não críticos (C): correspondem aos fatores que podem ter alguma influência, mas que são menos importantes que os críticos. São

levantados no mapeamento inicial e devem ser revisados para serem alterados e tratados como uma operação padrão (SO) ou ruído (N).

- C. Operação padrão (SO): são aqueles pontos em que existe um padrão ou especificação para execução como nesse caso, por exemplo, a espessura das chapas.
- D. Ruído (N): fatores não controláveis ou que não influenciam os 'y's [30] [31] [32]

3 MATERIAIS E MÉTODOS

3.1 Materiais e equipamento de solda

Os testes realizados foram feitos com uso de uma estação de solda robotizada, composta por um braço robótico e eixos externos que se comunicam com a máquina de solda. O braço robótico utilizado possui 7 eixos com raio de alcance de 1900mm montado na posição vertical suspensa de ponta-cabeça sobre eixos externos que permitem movimentos adicionais para que o envelope de deslocamento cubra todo o volume de trabalho das peças. O sistema inclui sensores que fazem a localização do início da junta, através de toques na peça com o bocal energizado com determinada tensão, e correções de trajetória em tempo real baseados em leituras de variações nos valores de corrente durante a soldagem quando utilizado um padrão de oscilação. Para isso o sistema compara os valores de corrente nos pontos mais altos e mais baixos do movimento oscilatório que devem ser iguais ou muito próximos.

Caso haja discrepância entre esses valores significa que a trajetória real está diferente da trajetória programada, e então o sistema faz a correção automaticamente na direção necessária para equalizar esses valores mantendo assim o centro do eletrodo sempre na posição em relação a junta conforme programação original.

A fonte de solda que compõe o sistema é a TPS 600i. É uma máquina do tipo inversora digital controlada por microprocessador que permite soldar com processos convencionais e pulsados além de contar com processos LSC (*Low Spatter Control*); CMT (*Cold Metal Transfer*) e PMC (*Pulse Multi Control*), capaz de trabalhar com correntes de até 600A a 60% e 500A a 100% em um tempo de arco de 10 minutos com temperaturas de 40°C. Conta com uma unidade de refrigeração para resfriamento do sistema e do bocal de soldagem.

Para a realização dos ensaios de soldagem serão utilizados corpos de prova em aço ASTM A572 GR50 com dimensões 295x120x10 mm (Comprimento x Largura x Espessura), cortados pelo processo à plasma e jateados com granalha do tipo angular. A escolha desse material foi feita baseado na combinação mais comum de matéria prima e espessura das peças soldadas por empresas do setor de soldagem de máquinas pesadas. O processo

de corte a plasma foi selecionado devido ao custo inferior, porém o processo de corte mais comum para essa espessura é Laser. Já o jateamento foi feito uma vez que maior parte das peças recebidas são preparadas dessa forma, sendo capaz de limpar a superfície e remover camada óxido superficial resultante da laminação. Essas características superficiais quando não removidas podem gerar defeitos, principalmente mordeduras, nos cordões de solda. Por sua vez as dimensões selecionadas tiveram objetivo de otimizar o aproveitamento de material disponível além de permitir um maior comprimento de cordão a fim de poder ter tempo de abertura e estabilização do arco elétrico, além de garantir dissipação de calor, simulando taxas de resfriamento próximas à realidade, e permitir observação da soldagem por mais tempo.

Com isso foram confeccionadas juntas em ângulo conforme a Figura 20.

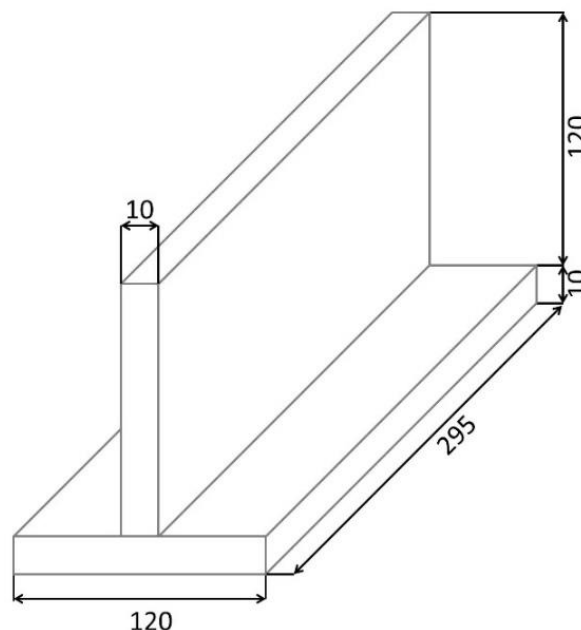


Figura 20: Representação dos corpos de prova soldados usando chapas do aço ASTM A572 GR50 (Dimensões em mm).

Além disso, o metal de adição utilizado foi AWS 5.18 ER70S-6 [33], com bitola de 1,32 mm, cuja composição química é apresentada na Tabela 3. Para proteção será utilizada uma mistura gasosa 82%Ar / 18%CO₂.

Tabela 3: Composição química do metal de adição AWS A5.18 ER70S-6 [33].

Elemento	C	Si	Mn	P	S	Cr	Ni	Cu	Mo	V
%p	0,12	1,15	1,8	0,025	0,025	0,15	0,15	0,35	0,15	0,03

3.2 Métodos

Para chegar nos objetivos desse trabalho foram utilizados métodos para análise do processo, realização de testes de soldagem e ensaios conforme descritos nos subtópicos a seguir. Além disso, Tabela 4 resume todas as etapas do trabalho com seus respectivos objetivos.

Tabela 4: Etapas para realização do trabalho e seus objetivos.

Etapa	Objetivo
Definição da meta de velocidade de deslocamento	Análise do estado inicial em relação a capacidade produtiva da célula e definição meta de velocidade de deslocamento.
SIPOC-Y	Elencar etapas envolvidas no processo, suas características e limites.
Mapa de processo	Criar fluxo do processo listando seus objetivos e parâmetros atrelados a cada etapa.
Testes iniciais	Soldagem e análise de corpos de prova, realizadas nas instalações do fabricante da máquina de solda, com objetivo de identificar e sanar dúvidas sobre parâmetros relevantes do processo.
Revisão do mapa de processo	Obter versão final do fluxo processo e parâmetros atrelado a cada etapa.
Testes <i>In Loco</i>	Soldagem e análise de corpos de prova, realizada na célula de soldagem produtiva da empresa, com objetivo encontrar parâmetros capazes de cumprir velocidade de soldagem definida como meta.
Dureza Vickers	Comparar o perfil de microdureza Vickers das juntas soldadas pelo processo pulsado convencional e PMC
Micrografias	Entender e comparar as microestruturas das juntas soldadas pelo processo pulsado convencional e PMC.

3.2.1 Análise do processo

Primeiros passos foram análise dos tempos de processo através de cálculos de capacidade produtiva e simulações de tempo de ciclo com utilização

do software de programação *off-line* que a célula de soldagem possui. Em seguida aplicaram-se métodos de análise SIPOC-Y e Mapa de processos.

SIPOC – Y, cuja finalidade é deixar claro e visível em um nível macro todos os pontos envolvidos naquele processo, bem como os arredores [29].

Além dos pontos da análise SIPOC tradicional, foram incluídas também as variáveis resposta Y que são os objetivos a serem alcançados, envolvendo aumento da velocidade de deslocamento na soldagem no caso específico desse trabalho.

Um mapa de processo ilustra o fluxo de trabalho de uma organização ou processo. Um fluxo de trabalho consiste em um conjunto de atividades inter-relacionadas, que seguem um determinado caminho enquanto os *inputs* do projeto são transformados em *outputs* [30] [31] [32]. Nesse trabalho, o mapeamento foi feito apenas dentro dos limites que cercam o processo de solda robotizada.

3.2.2 Soldagem

A realização da soldagem de corpos de prova foi feita inicialmente nas instalações do fabricante da máquina de solda no Brasil utilizando os mesmos materiais descritos na seção 3.1, exceto pela estação de soldagem robotizada uma vez que a do fabricante é diferente da produtiva, juntamente com um inclinômetro digital. A Figura 21 ilustra o arranjo montado.



Figura 21: Arranjo experimental de testes soldagem realizados pelo fabricante da máquina de solda.

Esses testes iniciais foram conduzidos para gerar conhecimento e fornecer informações de forma a reduzir o tempo de parada da célula robotizada produtiva, porém a continuidade destes testes no mesmo local onde seriam soldadas as peças de produção foi imprescindível pois assim seria possível lidar com a situação mais próxima da realidade. Nestes testes foram variados os seguintes parâmetros:

- A. Modo de transferência
- B. Vazão de gás
- C. Largura de oscilação
- D. Altura de oscilação
- E. Ângulo de trabalho
- F. Ângulo de deslocamento

Após isso, novos testes foram realizados na célula produtiva onde um arranjo similar ao anterior foi montado com a diferença que dessa vez, além de obviamente o robô de solda, utilizou-se uma bancada para posicionar corpos de prova, uma vez que a célula produtiva não dispunha de um posicionador com mesa. Essa bancada teve como objetivo padronizar posicionamento dos corpos de prova. A Figura 22 mostra esse arranjo:



Figura 22: Arranjo experimental de testes soldagem realizados na célula produtiva.

Importante citar que a máquina de solda utilizada dispõe de recursos que exibem valores nominais médios de tensão, corrente, velocidade de alimentação e até mesmo *heat input* total de cada cordão de solda executado.

3.2.3 Ensaios de caracterização dos cordões de solda

Para analisar se os cordões de solda atendiam ou não requisitos de qualidade foram realizados alguns ensaios seguindo a ordem abaixo:

- A. Inspeção visual na busca por defeitos superficiais (conforme Tabela 2: Defeitos de soldagem.)
- B. Dimensional garganta de solda
- C. Dimensional raio de transição
- D. Macrografias
- E. Ensaio dureza Vickers
- F. Micrografias

Os corpos de prova que apresentavam algum tipo de defeito ou que não cumpriam requisitos dimensão de garganta e raio de transição eram segregados e não passavam para etapas seguintes. O dimensional de garganta foi realizado com cálibre de solda Marca Aynek modelo AK -242 seguindo orientações do fabricante onde deve-se apoiar a base do cálibre firmemente e encostar a ponta no pé da solda e fazer a leitura da dimensão desejada (garganta ou perna) na escala correspondente. Figura 23 abaixo ilustra esse procedimento.



Figura 23: Dimensionamento do cordão de solda.

A medição do raio de transição também foi feita através de cálibre pois é um método fácil de ser aplicado, porém a leitura dos valores é obtida de forma

indireta. Para isso utiliza-se um cálibre de raio, composto de diversas lâminas com diferentes raios pré-definidos e um bloco padrão fabricado a partir de um bloco sólido usando usinagem por descarga elétrica para obter uma alta precisão geometria da superfície, $\pm 0,03$ mm que se assemelha a uma junta soldada em forma de cruz onde os quatro lados diferentes contêm um raio de transição de acordo com os requisitos dentro da solda.

A operação de medição é realizada manualmente, para isso utiliza-se um cálibre de raios, Figura 24 à esquerda, e um bloco padrão, Figura 24 à direita. Para medir um raio de transição de, por exemplo de 0,3mm, utiliza-se a lâmina do cálibre de raio de 1mm e coloca-se sua ponta no raio de 0,3mm do bloco padrão e como o raio da lâmina será maior que o do bloco ficará um pequeno espaço entre ambos. Após isso, coloca-se uma lanterna de um lado e do outro lado deverá ser observada a quantidade de luz que passará por esse espaço. Na sequência coloca-se o cálibre de raios no pé do cordão de solda e, da mesma forma, observa-se a quantidade de luz que passa através do espaço entre a ponta do cálibre e o pé da solda, comparando-se com a quantidade de luz observada quando visto no bloco padrão. Caso seja observado menos luz, significa que o raio da solda é maior que 0,3mm, por outro lado ao notar-se mais luz isso mostra que o raio é menor que 0,3mm [19].

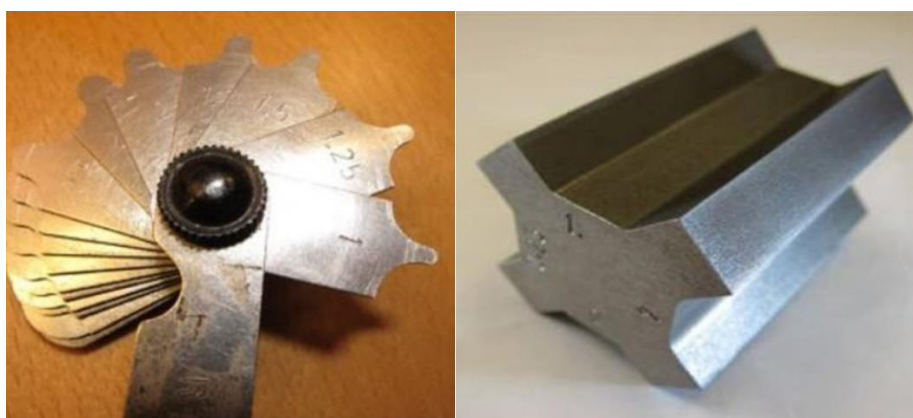


Figura 24: Cálibre de raio e bloco padrão [19].

Importante notar que existem outros métodos mais precisos, mas que exigem equipamentos que normalmente não fazem parte do dia a dia de um

ambiente produtivo industrial. Para obtenção de valores mais precisos tanto da garganta de solda quanto do raio de transição foram feitas também medidas através do software ImageJ utilizando as imagens das macrografias.

Os corpos de provas aprovados nas etapas anteriores foram encaminhados para realização de macrografias preliminares, nas quais o modo de preparação era simples, pois sua execução deveria ser rápida com a finalidade de prover apenas uma visualização superficial a olho nu da seção transversal das amostras soldadas para uma análise simplificada do perfil de penetração e ZAC. Para tanto, foram feitos cortes com 80mm de espessura da seção transversal na parte central do corpo de prova com uso de serra transversal, seguido de lixamento com disco abrasivo tipo *flap* e posterior ataque com Nital 5% por 80 segundos para revelação da macroestrutura, e assim avaliação do perfil de penetração, penetração de raiz e reavaliação de garganta e raio de transição.

Essas macrografias foram realizadas com recursos disponíveis no ambiente produtivo com objetivo de obter informações mais detalhadas com maior rapidez, principalmente de penetração de raiz. Como esse é um requisito que requer um teste destrutivo para análise, isso faz com que o controle dos parâmetros do processo seja uma etapa crucial em uma produção seriada. Portanto, os procedimentos de soldagem devem ser planejados e testados de forma a validar que são capazes de cumprir os requisitos de projeto. Para garantir isso utiliza-se EPS – especificação de procedimento de soldagem – que deve cobrir todos os parâmetros da junta soldada seguindo normas específicas [21].

As amostras que cumpriam requisitos especificados foram então submetidas a novas macrografias com a finalidade de proporcionar avaliações mais detalhadas utilizando recursos disponíveis em laboratórios com preparação feita através de lixamento com lixa d'água iniciando gramatura de 400 até 1200, com posterior ataque químico com Nital 5% por aproximadamente 200 segundos, de forma a criar um contraste acentuado entre metal de base, ZAC e metal de adição, e parada da reação com álcool etílico PA. As imagens foram registradas utilizando estereomicroscópio marca Olympus, modelo SZ61 e

permitindo a realização do dimensionamento de garganta, pernas, penetração de raiz e raio de transição com auxílio do software ImageJ.

Com o objetivo de comparar as possíveis diferenças de microestrutura e de propriedades entre o processo de soldagem PMC com o processo pulsado convencional também foram soldadas amostras pelo processo pulsado convencional. Dessa forma, todas essas amostras foram submetidas ao ensaio de dureza Vickers com carga de 2kgf (HV 2,0) utilizando o equipamento marca Shimadzu modelo HVM-G 20ST pertencente ao grupo M2PS – Microestrutura e Propriedades em Processos de Solidificação do DEMa-UFSCar com objetivo de avaliar perfis de microdureza, conforme normas ISO 9015-1 e ISO 9015-2 [25] [26]. A Figura 25 ilustra como foram realizadas as medições do perfil para posterior levantamento dos gráficos de perfis de microdureza.

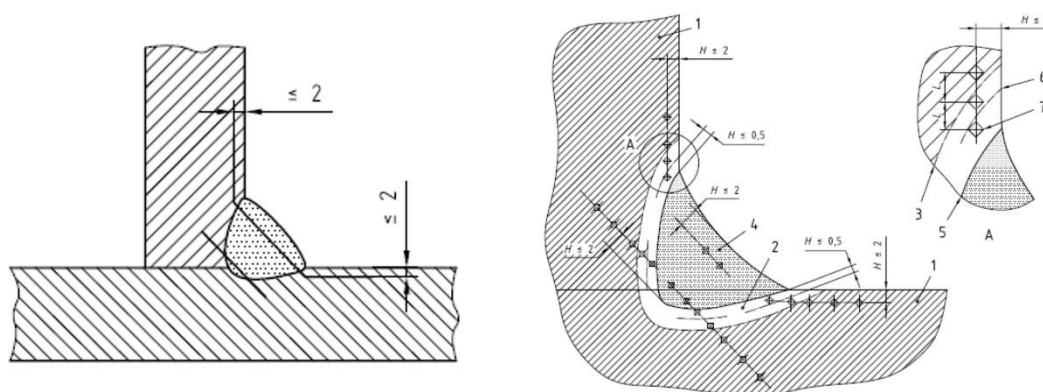


Figura 25: Perfil de microdureza Vickers de juntas em ângulo de acordo com a norma ISO 9015-2 [26].

Como pode ser visto, as localizações das impressões são feitas seguindo duas trajetórias, uma mais próxima à superfície e outra no final da penetração sendo que ambos os casos, naturalmente, as medições contemplam as regiões do metal base, ZAC e metal de adição.

Para haver uma padronização na forma de medição entre as amostras submetidas ao ensaio de dureza para posterior análise dos resultados foram traçadas 4 retas, denominadas segmento 1, segmento 2, segmento 3 e segmento 4 conforme Figura 26 abaixo.

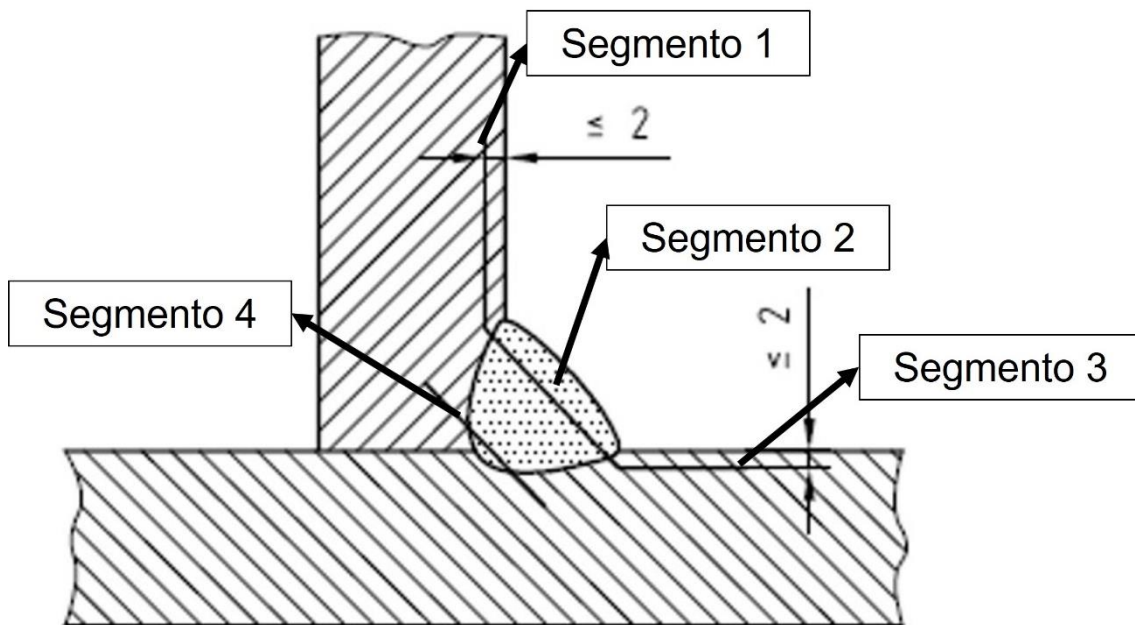


Figura 26: Identificação segmentos de reta do perfil de dureza Vickers [26].

Os segmentos 1 e 3 foram traçados a uma distância de 2mm da face de cada chapa. Por sua vez, para traçar o segmento 2 foi mantida uma distância de 2mm a partir de uma linha ligando os pés do cordão. Já o segmento 4 foi traçado com uma linha paralela ao segmento 2 com uma distância de 2mm da raiz da solda. A Figura 27 abaixo ilustra esquematicamente o procedimento descrito acima.

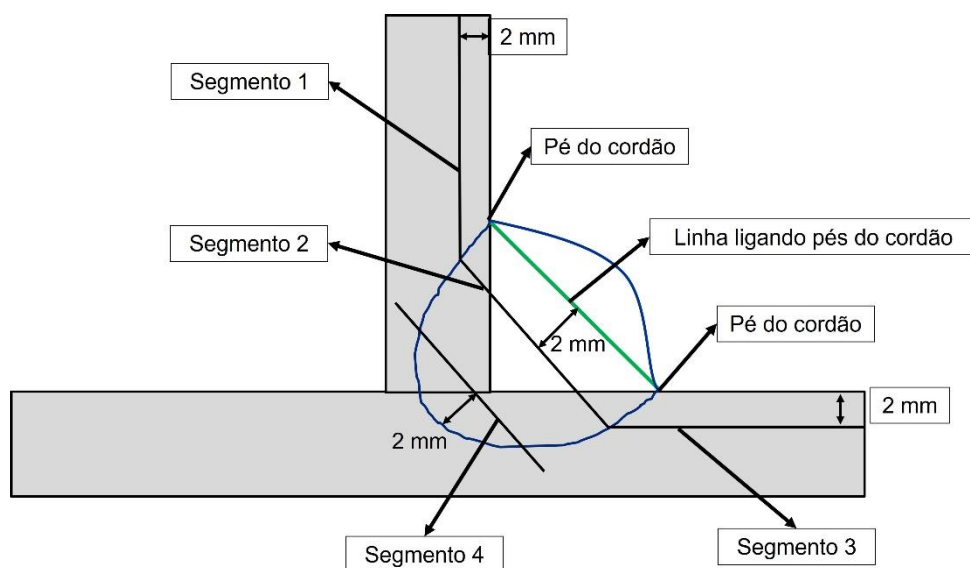


Figura 27: Localização do traçado dos segmentos de dureza Vickers.

Além disso, o ponto inicial do segmento 1 foi definido como sendo 3mm acima da intersecção entre o segmento 1 e 2 enquanto o ponto inicial do segmento 4 ficou estabelecido a 3mm da intersecção entre esse e o perfil de penetração. Essas medidas estão representadas na Figura 28.

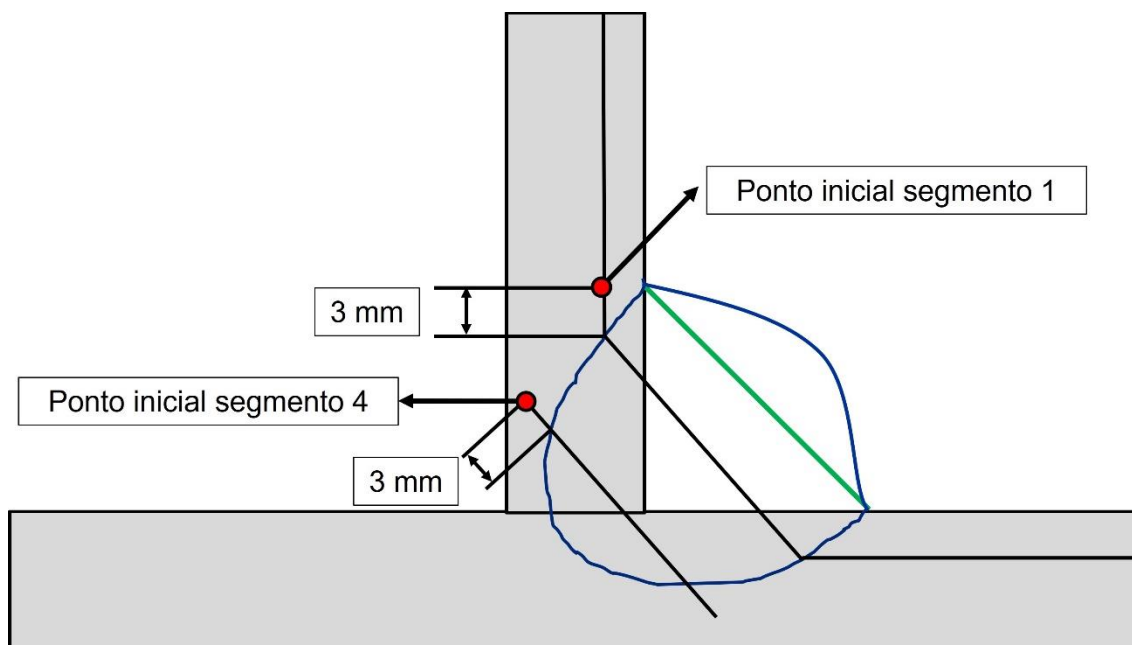


Figura 28: Pontos iniciais dos perfis de dureza Vickers.

O espaçamento entre cada ponto de dureza foi de 0,5mm. Foi feito um total de 60 pontos por amostra sendo distribuídos da seguinte forma:

- Segmento 1: Pontos 1 a 8
- Segmento 2: Pontos 9 a 29
- Segmento 3: Pontos 30 a 35
- Segmento 4: Pontos 36 a 60

Com finalidade de entender as características microestruturais e as alterações causadas pelo processo de soldagem, as 2 amostras, uma soldada pelo processo PMC e outra pulsado convencional, foram submetidas a microscopia ótica utilizando Olympus BX41M-LED. Para isso passaram por um novo processo de preparação usual com corte embutimento em baquelite, lixamento, polimento e ataque químico. As regiões observadas em cada amostra foram metal base, ZAC e metal de adição.

4 RESULTADOS E DISCUSSÃO

4.1 Definição da meta de velocidade de deslocamento

Antes da definição de uma meta é preciso saber claramente o estado inicial do processo e quais as suas vantagens, desvantagens e/ou limitações para assim traçar uma meta desafiadora, porém factível e condizente com a realidade. O estudo do processo de soldagem executado pela célula robotizada de soldagem começou com a identificação dos tempos de ciclos atuais dessa célula divididos entre operações que agregam valor e as que não agregam valor. As primeiras operações se referem a processos pelos quais o cliente enxerga valor no produto e paga por eles. Ademais todo restante das atividades oneram o processo adicionando custos e não geram retornos financeiros. Aplicando essas definições em uma operação de soldagem essa divisão é bastante clara: o tempo de soldagem, arco aberto, é a operação que agrega valor enquanto todo tempo restante, em sua maioria movimentações, não agrega valor [34].

De forma geral, analisar as operações que não agregam valor trazem um maior número de oportunidades de redução do tempo de processo com maior facilidade e menores custos de implementação. Isso é um dos pontos observados por Toyota e praticados no *lean manufacturing* [35]. Porém tais oportunidades podem envolver aspectos culturais e, apesar da maior facilidade, fazer com que esses ganhos sejam perenes requer um esforço de mudança ou adaptação de comportamento.

Por outro lado, oportunidades de redução de tempo de processo em operações que agregam valor são mais raras e normalmente estão atreladas a mudanças de tecnologias e que geralmente são acompanhadas de maiores investimentos. Porém essas oportunidades são a fonte de resultados mais expressivos e diretos.

A Tabela 5 mostra o estado inicial dos tempos de ciclo e sua divisão em tempo de arco aberto (agrega valor) e tempo de movimentação (não agrega valor), além da porcentagem de tempo de arco aberto em relação ao tempo ciclo total inicial. Esses dados correspondem ao processo executado pela célula robotizada de soldagem para cada uma das quatro peças processadas por essa célula.

Tabela 5: Tempos de ciclo e suas divisões correspondentes ao estado inicial do processo de soldagem robotizada das peças 1, 2, 3 e 4.

Peça	Tempo ciclo total [horas]	Tempo arco aberto [horas] Operações Agrega Valor (AV)	Tempo movimentação [horas] Operações Não Agrega Valor (NAV)	%AV atual (Tempo de ciclo ÷ Tempo de arco aberto)
1	02:22:00	01:40:00	00:42:00	70%
2	01:48:40	01:14:00	00:34:40	68%
3	02:02:13	01:31:00	00:31:13	74%
4	03:22:42	02:30:50	00:51:52	74%

Portanto, analisando esses resultados, percebe-se elevados valores na relação %AV. Esse resultado pode ser interpretado de duas formas:

- A. Processo bastante eficiente, já que a relação %AV é elevada e, portanto, a maior parte do tempo total de ciclo corresponde ao tempo em que se está fazendo operações ou atividades de interesse para o cliente e com poucas opções de ganhos trabalhando na redução tempo movimentação;
- B. Oportunidade de se trabalhar na redução de tempo de arco aberto já que corresponde a maior parcela do tempo total de processo.

Dessa forma a escolha foi trabalhar com a redução de tempo arco aberto para se alcançar resultados mais significativos de redução tempo ciclo. A redução de tempo de arco aberto é alcançada através do aumento da velocidade de deslocamento de soldagem. Para isso, o primeiro passo foi fazer o levantamento do número de cordões de solda, de acordo com garganta, e posições distintas de soldagem existentes nas peças 1, 2, 3 e 4 produzidas pela estação soldagem robotizada avaliada nesse Mestrado na forma de um estudo de caso. A Tabela 6 mostra o resultado dessas quantidades de acordo com o tamanho de garganta.

Tabela 6: Contagem do número de especificações de garganta de solda nas peças 1, 2, 3 e 4 produzidas pela estação soldagem robotizada.

Garganta	Quantidade de cordões
a3	109
a4	190
a5	268
a6	79

Percebe-se que a maior parte das soldas requer 5 milímetros de garganta e, portanto, são as juntas soldadas que devem ser foco do estudo. Além disso, sabendo que as posições de soldagem são apenas 1F (plana) e 2F (horizontal) [9] foram anotadas as velocidades de deslocamento iniciais como sendo, respectivamente, 38 cm/min e 36 cm/min.

Sabendo também que a capacidade produtiva atual estava no limite e com desejo de aumentá-la, para ser possível absorver maior volume de produção, calculou-se a velocidade de deslocamento necessária para cumprir tal necessidade. Para isso foram utilizadas as informações de tempo de ciclo, tempo de arco aberto, tempo de movimentação, apresentados na Tabela 5, e feita a consideração de que o tempo de arco aberto era impactado apenas pelas juntas soldadas com 5mm de garganta, levando-se em conta a quantidade predominante desses cordões de solda nas peças soldadas por aquela célula de solda robotizada. Além disso, foi considerada velocidade de deslocamento de 37cm/min, média entre 38 cm/min e 36 cm/min das posições 1F e 2F para solda com 5 mm de garganta. Assim foram encontrados os seguintes valores de velocidade, conforme Tabela 7.

Tabela 7: Velocidade de deslocamento (em cm/min) para cada peça.

Peça	Velocidade atual [cm/min]	Velocidade calculada [cm/min]
1	37	45
2	37	45
3	37	44
4	37	44

Pode-se notar que os resultados calculados foram de 44 cm/min e 45 cm/min. Dessa forma, a meta definida para velocidade de deslocamento foi de

46 cm/min para um cordão caracterizado por 5 mm de garganta em ambas as posições solda: 1F e 2F. Esse valor foi definido com objetivo de contornar a consideração feita de considerar apenas soldas 5mm de garganta e a velocidade média de deslocamento entre as posições de soldagem.

A célula de soldagem robotizada dispõe de uma estação de programação off-line que consiste em um computador com software que reproduz o equipamento em um ambiente virtual, facilitando assim a programação e testes sem a necessidade de uso da célula real. Esse recurso foi utilizado para verificar se essas considerações e aproximações eram válidas e checar se os tempos calculados na programação off-line disponível para essa célula eram condizentes com a realidade. Para isso comparou-se o tempo de ciclo desejado calculado com o tempo de ciclo obtido na programação off-line, alterando-se a velocidade de deslocamento das soldas a5 nas posições 1F e 2F para 46 cm/min. A Tabela 4 mostra os resultados desses cálculos em termos de tempos de ciclos.

Tabela 8: Comparação tempos de ciclo calculado e simulados na programação off-line após ajuste da velocidade de soldagem para 46 cm/min nas soldas a5 posições 1F e 2F.

Peça	Tempo de ciclo desejado [horas]	Tempo ciclo simulação off-line [horas]	Diferença [%]
1	02:04:43	02:08:13	-3%
2	01:35:26	01:36:23	-1%
3	01:47:20	01:44:15	3%
4	02:58:02	02:55:45	1%
Diferença média			0%

Logo, é possível perceber que as aproximações por meio das considerações adotadas são bastante próximas da realidade.

Com esses números em mãos foi feito uma consulta a outros fabricantes que produzem equipamentos com especificações semelhantes. O objetivo dessa consulta foi a troca de experiências e fazer o levantamento de informações de velocidade de deslocamento utilizadas para esse tipo peças, garganta e posição

de solda, bem como chegar em um consenso do que pode ser considerado como uma boa ou alta velocidade.

Alguns desses fabricantes reportaram alcançar velocidades acima de 50 cm/min, porém com uso de eletrodos que, para aplicações robotizadas no Brasil, dificilmente são vantajosos do ponto de vista financeiro. No entanto, a maioria que utiliza arames similares ao processo em estudo reportou velocidades de soldagem entre 45 cm/min e 50 cm/min. Portanto, a conclusão foi que a meta estabelecida para velocidade de deslocamento de 46 cm/min é factível.

Porém, há um ponto muito importante a ser observado. Nos testes iniciais de parametrização dessa solda durante a instalação da célula robotizada, as velocidades de deslocamento foram definidas em 44 cm/min e 42 cm/min nas posições 1F e 2F, respectivamente, para um cordão de solda a5. A redução para os valores de 38 cm/min e 36 cm/min foi feita após soldagem das primeiras peças, uma vez que foram observados defeitos como desvios do raio de transição, definição ilustrada na Figura 14 e, principalmente, mordeduras, definição dada na Tabela 2, sendo possível assim absorver variações inerentes ao processo de ponteamto, operação anterior a soldagem robotizada, conforme fluxo ilustrado na Figura 1, evitando retrabalhos posteriores.

Assim sendo o processo atual é capaz de chegar a valores de velocidade de deslocamento próximos ao desejado, porém não se manteria estável e dessa maneira há necessidade da busca por processos e tecnologias capazes de atender ambas as necessidades.

4.2 SIPOC-Y

Sabendo que o processo de soldagem utilizando não seria possível atingir as velocidades de deslocamento desejadas sem comprometer a estabilidade do processo em termos de qualidade, a busca de processos capazes de cumprir esse objetivo será iniciada com uma análise SIPOC-Y. Utilizando essa ferramenta para o caso de interesse desse trabalho, iniciando o preenchimento do diagrama do centro para a esquerda e depois do centro para direita, tem-se como resultado a Figura 29.

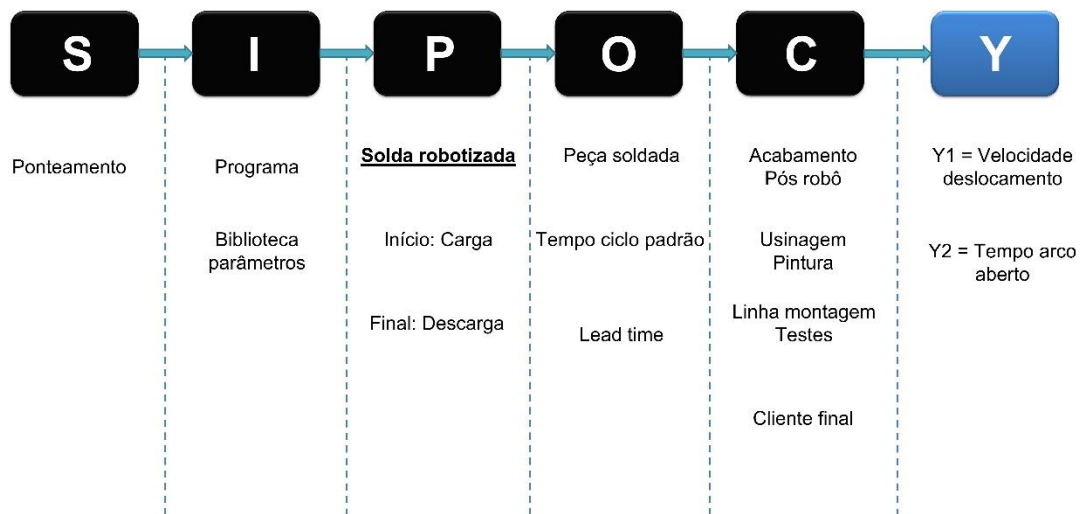


Figura 29: Diagrama SIPOC – Y para análise do processo de soldagem robotizada.

Portanto, o Processo (**P**), solda robotizada, tem seus limites, início com a carga, ou seja, a entrada da peça a ser soldada, e o final com a descarga. Em seguida, os Insumos (**I**), que são o programa do robô de soldagem, responsável por toda a trajetória da solda, seja ela soldando ou não, possui sua biblioteca de parâmetros, que correspondem aos parâmetros que serão utilizados para realização de cada cordão de solda, e obviamente a peça. Esta peça já é ponteadada (**S**), fornecida pela operação de pontejamento onde todas as peças e subconjuntos soldados e/ou usinados são agregados.

A saída do processo é composta naturalmente pela peça soldada, tempos padrão e parte do lead time total para fabricação (etapa '**O**' na Figura 29). Os clientes dessa etapa por sua vez são primeiramente as operações de acabamento (**C**), onde são feitas operações em que o robô não tem acesso ou soldas de pequenos componentes que não fazem sentido serem soldados por um robô, uma vez que o tempo de movimentação do braço robótico para acessar essas peças seria maior que o realizado por um ser humano. Em seguida, a peça passa por operações de usinagem (quando aplicável), pintura, para então passar pela linha de montagem, inspeção até chegar ao cliente final.

Por último a variável alvo do trabalho que é a velocidade de deslocamento (**Y**), que por sua vez afetará o tempo de arco aberto e consequentemente o tempo total de ciclo da peça.

4.3 Mapa de processo

O mapa de processo foi elaborado considerando os limites da etapa P do diagrama SIPOC-Y, ou seja, início com a carga e fim com a descarga da peça na célula de soldagem robotizada. A Figura 30 mostra esse resultado:

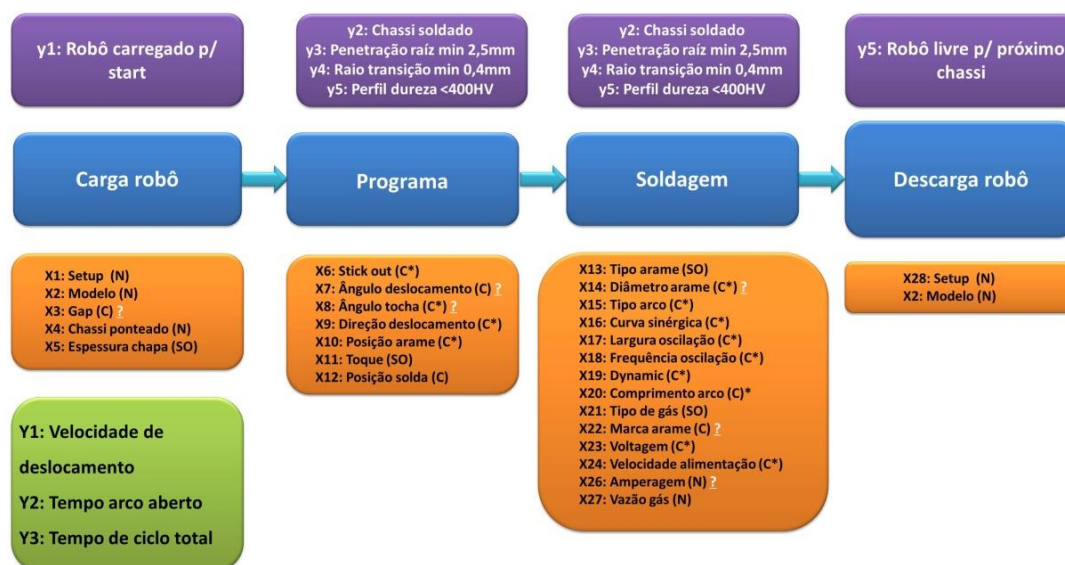


Figura 30: Mapa de processo inicial da soldagem robotizada estudada.

Apesar de ser um processo simples, com poucas etapas entre o início e o final, o número de fatores envolvidos é elevado, o que adiciona complexidade na análise sendo necessário realização de testes iniciais para poder construir conhecimento sobre o processo. Dessa forma, torna-se possível resolver dúvidas sobre classificação de alguns fatores, reduzir o número de fatores críticos e assim simplificar a continuação dos testes.

4.4 Testes iniciais

Os testes realizados em parceria com fabricante da máquina de solda tiveram resultados satisfatórios, atingindo as especificações para garganta e penetração, além de elevada velocidade de soldagem com 60 cm/min tanto para posição 1F quanto para posição 2F. Os parâmetros utilizados que resultaram em melhores cordões são mostrados na Tabela 9 abaixo.

Tabela 9: Parâmetros iniciais associados a solda tipo a5.

Posição	Modo de transferência	Vazão de gás [l/min]	Velocidade de deslocamento [cm/min]	Largura de oscilação [mm]	Altura de oscilação [mm]	Ângulo de deslocamento [°]	Ângulo de trabalho [°]
1F	PMC-PCS	12-15	60	3	2,3	~20	~45
2F	PMC-PCS	12-15	60	4,5	3	~23	~52

A Figura 31 mostra o aspecto visual obtido para cordão gerado com 5 mm de garganta e 60 cm/min de velocidade de deslocamento na posição 1F. Nota-se um cordão limpo, homogêneo e sem defeitos superficiais.



Figura 31: Aspecto visual do cordão de solda associado ao teste inicial para cordão a5 e posição 1F.

A Figura 32 apresenta a macrografia da seção transversal do cordão apresentado na Figura 31. Observa-se que o perfil de penetração é uniforme, levemente convexo e livre de defeitos.

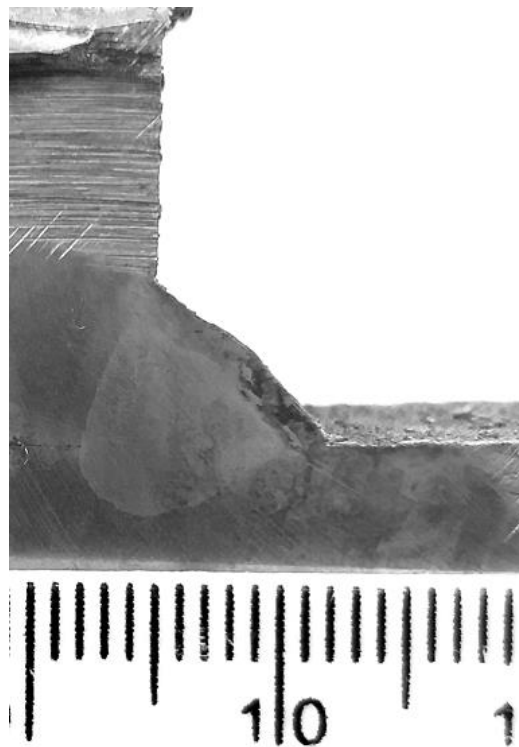


Figura 32: macrografia resultante do teste inicial para cordão a5 e posição 1F.

Além disso, a garganta e a penetração de raiz foram dimensionadas, conforme Figura 33, e os valores encontrados foram 5,3 mm e 4 mm respectivamente.

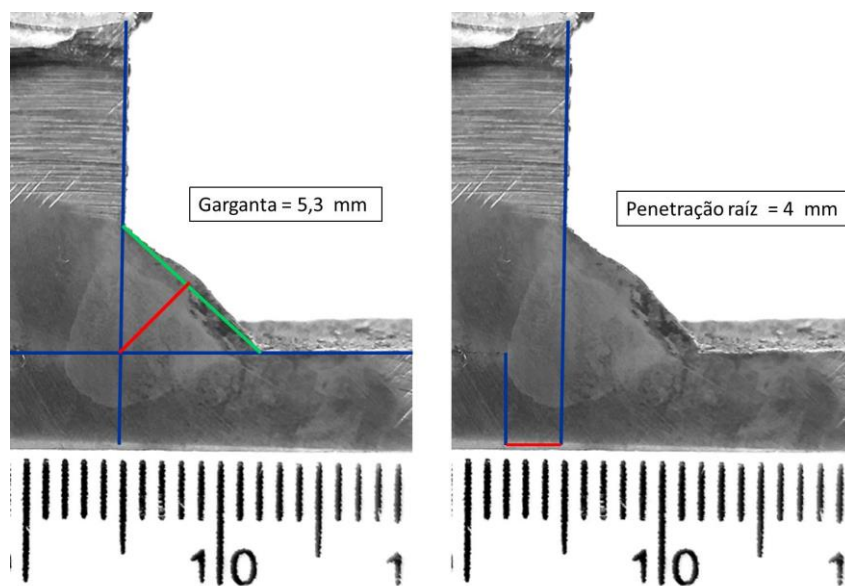


Figura 33: Dimensões em mm da garganta e penetração raiz obtidos a partir de teste inicial para cordão a5 e posição 1F.

Na Figura 34 é mostrado o aspecto visual obtido para cordão com 5 mm de garganta e 60 cm/min de velocidade de deslocamento na posição 2F. Da mesma forma que o anterior é constatado um cordão são, ou seja, limpo, homogêneo e livre defeitos superficiais.



Figura 34: Aspecto visual do cordão de solda associado ao teste inicial para cordão a5 e posição 2F.

A macrografia da seção transversal do cordão mostrado na Figura 34 é apresentada na Figura 35. Ao comparar com o perfil anterior é possível distinguir um aspecto mais convexo na parte inferior do cordão, próximo a chapa horizontal, característico de cordões soldados nessa posição, uma vez que a poça de fusão sofre com ação da gravidade.

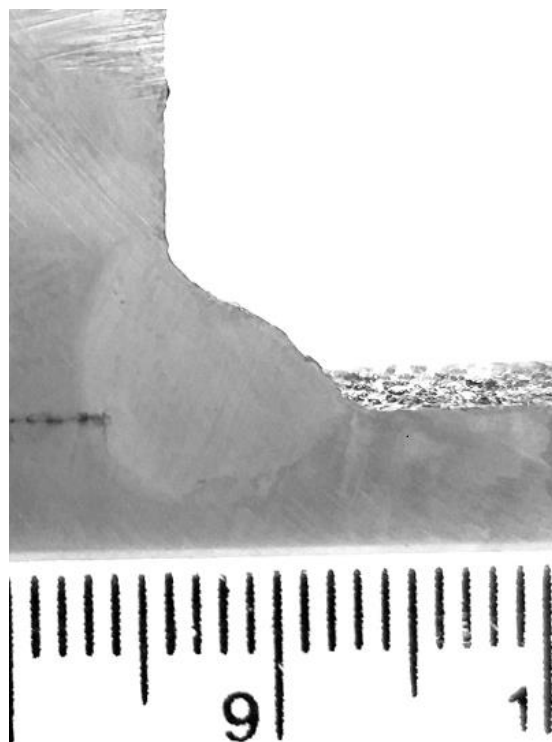


Figura 35: Macrografia resultante do teste inicial para cordão a5 e posição 2F.

Garganta e penetração de raiz também foram dimensionadas e os valores encontrados foram 5,0 mm e 3,0 mm respectivamente como exibido na Figura 36. O valor de garganta está conforme especificação do produto, porém 0,2 mm menor que o definido como meta, mas o resultado foi considerado satisfatório e passível de ajustes posteriores.

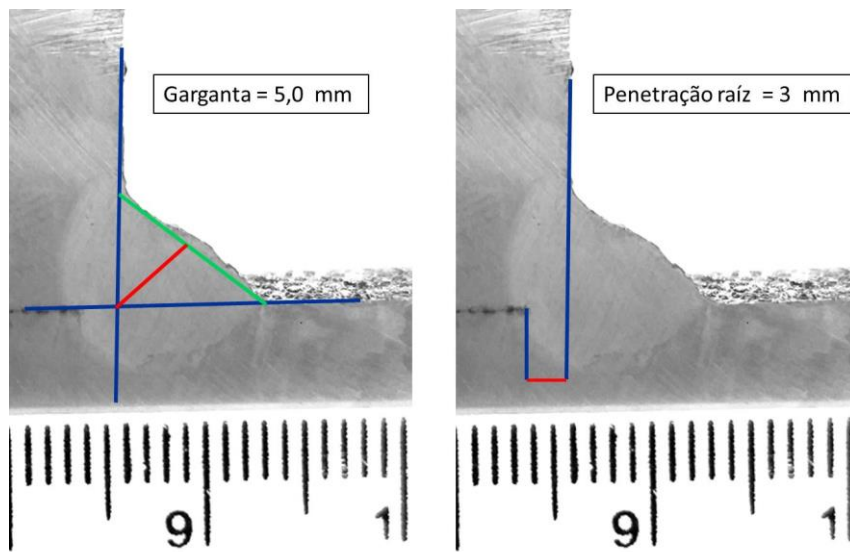


Figura 36: Dimensões em mm da garganta e penetração raiz obtidos a partir de teste inicial para cordão a5 e posição 2F.

4.5 Revisão do mapa de processo

Após os testes iniciais, o mapa de processo foi refeito conforme Figura 37. Isso porque as dúvidas na classificação de alguns fatores foram sanadas, bem como a confirmação dos fatores críticos a serem considerados. Além disso, houve a inclusão e classificação de novos fatores que são introduzidos pelo processo PMC. Também se percebeu que para alguns fatores, apesar de inicialmente terem sido bastante alterados, após algumas tentativas foram encontrados valores que se mostraram como ideais, podendo assim serem considerados como operações padrão.



Figura 37: Revisão mapa de processo após testes iniciais.

Portanto, dos 32 fatores presentes no processo, 5 foram considerados críticos, ou seja, influenciam não somente o objetivo como também os requisitos, sendo eles:

- Largura de oscilação:** Para soldagem robotizada com apoio de sensores é preciso que exista um movimento oscilatório feito pela tocha de soldagem, um dos componentes do sistema de soldagem, para que os esses sensores possam funcionar. O movimento oscilatório faz o deslocamento da ponta do arame de solda em relação à trajetória linear programada em uma determinada largura;
- Frequência de oscilação:** Parâmetro que determina quantos movimentos de oscilação por minuto serão realizados;
- Dynamic:** Fator de correção do arco pulsado que altera a frequência e duração dos pulsos além da altura da corrente de pico. Valores positivos resultam em corrente de pulso maiores, maior tempo e menor taxa de pulso, valores negativos atuam de forma inversa.
- Comprimento de arco:** Comprimento do arco elétrico formado entre a ponta do arame e a junta a ser soldada;
- Velocidade de alimentação:** Quantos metros por minuto do eletrodo serão alimentados na poça de fusão.

Vale destacar que as especificações das peças são 5 mm de garganta e 0,3 mm raio de transição, porém para ser capaz de absorver possíveis variações do processo de ponteamto, como por exemplo gaps que tendem a aumentar a penetração de raiz, mas diminuir a garganta de solda, foi determinado que y2: garganta mínima e y3: penetração de raiz e y4: raio de transição tivessem valores mínimos de 5,2 mm, 2,5 mm e 0,4 mm, respectivamente.

4.6 Testes *IN LOCO*

Além das inúmeras variáveis ligadas diretamente ao processo, a diferença entre marcas do robô utilizado nos testes iniciais e aquele da célula produtiva (apesar de usarem a mesma máquina de solda) também pode ter grande influência no resultado. Isso porque os softwares e comandos são diferentes, além da resistividade do sistema como um todo. Logo a execução dos testes iniciais fora do ambiente produtivo teve função de desenvolver conhecimento, reduzir o tempo necessário de parada da célula produtiva, identificar valores iniciais de parametrização, além é claro de confirmar se o processo era capaz de atingir objetivos.

Ao passar do ambiente de teste para a célula robotizada produtiva foram soldados 35 corpos de prova, sendo 14 na posição de soldagem 1F e 21 2F, iniciando com os mesmos parâmetros encontrados nos testes iniciais. Um ponto observado foi a dificuldade em alcançar o raio de transição especificado principalmente na posição 2F como pode-se perceber pela maior quantidade de corpos de prova soldados. Esse ponto era esperado uma vez que, como já citado, a poça de fusão sofre com a ação da gravidade tendendo a escorrer e, conseqüentemente, não formando um cordão uniforme, mas sim parcialmente côncavo próximo a perna da chapa na vertical e parte convexo na região da perna da chapa horizontal.

Com isso os parâmetros definidos nesta etapa preliminar foram conforme Tabela 10.

Tabela 10: Parâmetros de soldagem inicialmente definidos para testes in loco em solda a5 e posições 1F e 2F.

Solda	a5	a5
Curva sinérgica	3189	3189
Posição	1F	2F
Stick out [mm]	18	18
Ângulo deslocamento [°]	13	13
Ângulo trabalho [°]	45	45
Largura oscilação [mm]	3,5	3,5
Altura oscilação [mm]	1	1
Frequência oscilação [oscilações/min]	150	150
Dynamic	5	3
Comprimento arco	3	8
Estabilizador penetração	0,5	0,5
Estabilizador comprimento arco	0,1	0,1
WFS (m/min)	12,9	14
Velocidade de deslocamento [cm/min]	60	60
Tensão [V]	32,5	31,1
Corrente [A]	411	387

Esses parâmetros foram implementados nas peças produtivas e acompanhados e observou-se que, apesar dos resultados dos cordões terem sido bastante próximos dos alcançados nos corpos de prova, algo estava errado com o processo, pois havia defeitos como mordeduras e desvios consideráveis de raio de transição em pontos aleatórios. Além disso, foram observados problemas graves como colisões de tocha com a peça e até fugas agressivas da trajetória programada, ou seja, cordões de solda iniciavam no ponto correto, mas não seguiam a junta perfeitamente fazendo soldas nas superfícies das chapas.

A investigação da causa desses problemas resultou em um aprendizado inclusive para o fabricante da máquina de solda, que foi o fato dos sensores do robô, responsáveis pelo ajuste e correção da trajetória de soldagem, e os sensores da máquina de solda, ativados quando os parâmetros “estabilizador de

penetração” e “estabilizador de comprimento” de arco são utilizados, fazem uso das mesmas informações de tensão e corrente e estavam interferindo um no funcionamento do outro. Portanto, optou-se por não utilizar os estabilizadores da máquina de solda, uma vez que não é possível desligar os sensores do robô, tendo em vista que as variações em soldagem pesada, por menores que sejam, sempre estarão presentes.

Com isso os testes foram refeitos, reduzindo-se um pouco também a velocidade de soldagem, pois, assim como durante a instalação do equipamento, o a velocidade de deslocamento alcançada em corpos de prova provavelmente não seria reproduzível de maneira estável em peças produtivas devido as variações e as diferenças, como resistividade e calibração do sistema, entre o uso da bancada e os posicionadores que seguram e movimentam a peça para que o robô execute a soldagem.

Portanto, os novos parâmetros de processo foram definidos conforme Tabela 11.

Tabela 11: Parâmetros de soldagem redefinidos para testes em solda a5 e posições 1F e 2F.

Solda	a5	a5
Curva	3189	3189
Posição	1F	2F
Stick out [mm]	18	18
Ângulo deslocamento [°]	13	13
Ângulo trabalho [°]	45	45
Largura oscilação [mm]	3,5	2,5
Altura oscilação	1	1
Frequência oscilação [oscilação/min]	150	150
Dynamic	0	4
Comprimento arco	2	3
Estabilizador penetração	0	0
Estabilizador comprimento arco	0	0
WFS [m/min]	12,9	12,4
Velocidade de deslocamento [cm/min]	53	50
Tensão [V]	28,5	29
Corrente [A]	350	330

Esses parâmetros da Tabela 11 resultaram nos seguintes aspectos visuais e perfis de solda, conforme mostrado a seguir.

Verifica-se na Figura 38 o aspecto visual obtido para cordão com 5 mm de garganta e velocidades de deslocamento de 53 cm/min e 50 cm/min para as posições 1F e 2F, respectivamente, cordões com aspecto visual perfeito, homogêneos e livres de defeitos como respingos, poros e mordeduras.

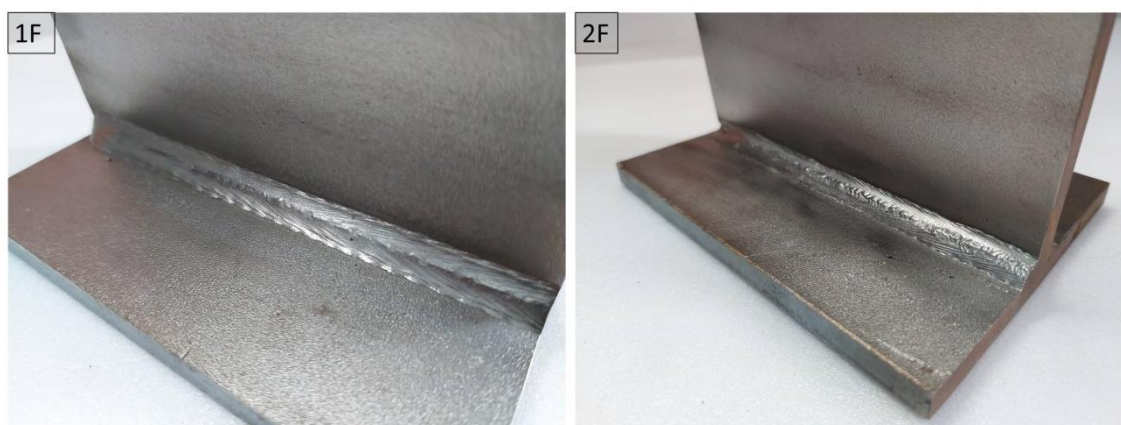


Figura 38: Aspecto visual obtido em testes in loco para cordão a5 e posições 1F e 2F soldados após redefinição dos parâmetros de solda conforme Tabela 11.

As macrografias da seção transversal dos cordões anteriores são apresentadas na Figura 39. Ao comparar esses perfis obtidos com aqueles dos testes iniciais apresentados na seção 4.4, verifica-se uma evolução bastante significativa com o cordão da posição 1F perfeitamente plano, com ambos raios de transição extremamente suaves, sem variações bruscas no perfil de penetração. De forma similar, o resultado para posição 2F mostra um cordão um pouco mais convexo, como esperado, porém mais simétrico que nos testes iniciais, com raio de transição suave mesmo na região da chapa na horizontal e também um perfil de penetração uniforme, mas um pouco mais afilado que na posição 1F. Isso é natural, uma vez que a largura de oscilação nessa posição é foi pouco maior que na posição 2F, fazendo com que a poça de fusão seja mais trabalhada e fique mais espalhada.

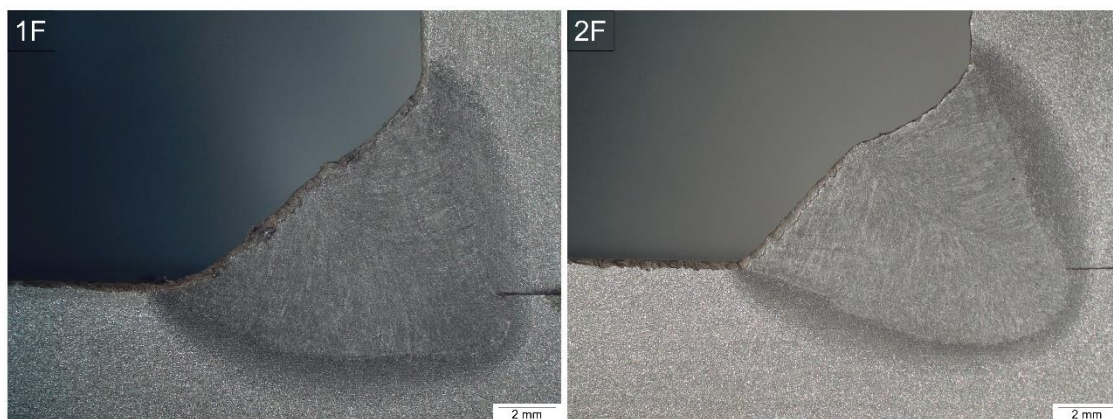


Figura 39: Macrografias da seção transversal de amostras testadas in loco para cordão a5 e posições 1F e 2F soldados após redefinição dos parâmetros de solda conforme Tabela 11.

As dimensões encontradas para garganta foram 5,4 mm para 1F e 5,3 mm para 2F e são mostradas na Figura 40. Ambas cumprem meta estabelecida de 5,2 mm.

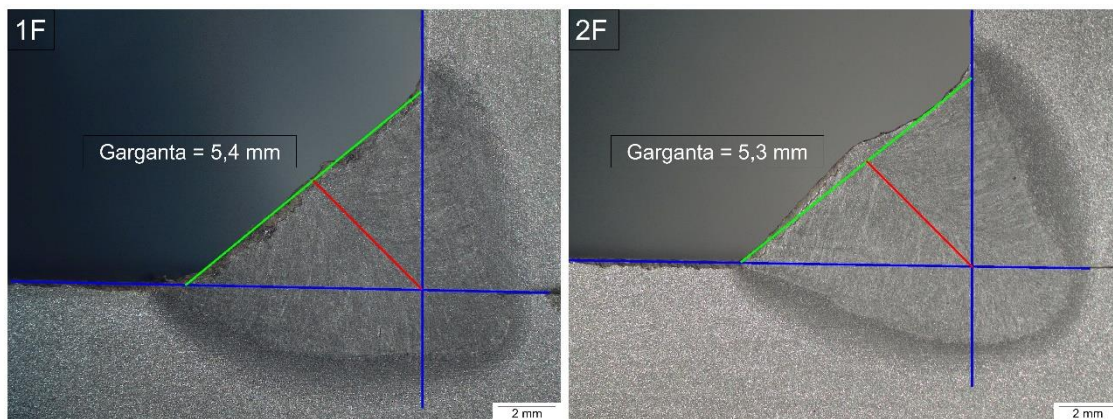


Figura 40: Aspectos dimensionais da garganta do cordão de solda para testes in loco considerando cordão a5 nas posições 1F e 2F soldados após redefinição dos parâmetros de solda conforme Tabela 11.

Os valores encontrados para penetração de raiz também superaram o determinado, sendo de 2,8 mm para posição 1F e de 3,4 mm para posição 2F, excedendo consideravelmente o definido de 2,5 mm, conforme Figura 41.

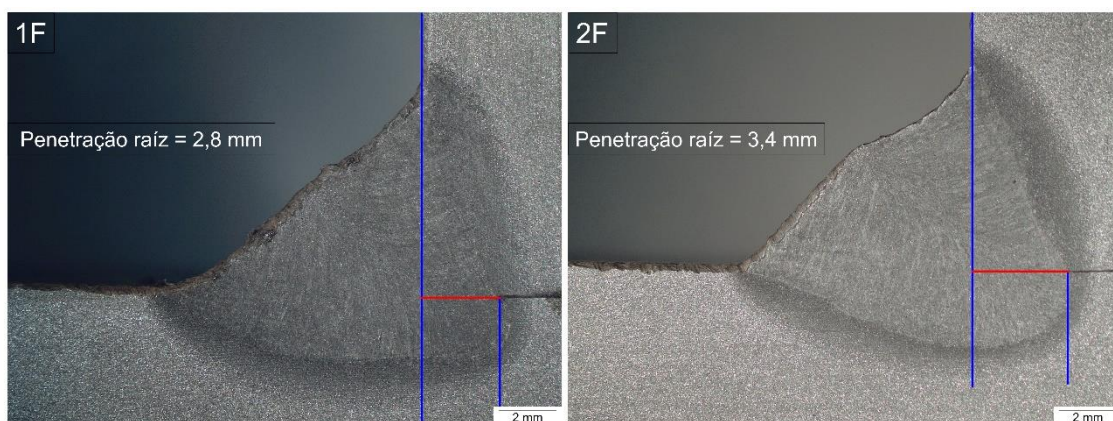


Figura 41: Dimensional mostrando a penetração de raiz associada aos testes in loco para cordão a5 nas posições 1F e 2F soldados após redefinição dos parâmetros de solda conforme Tabela 11.

Os raios de transição medidos na posição 1F foram 2,3 mm e 2,1 mm para as pernas 1 e 2 nessa ordem. Já para a posição 2F esses valores foram 1 mm e 1,4 mm, como visto na Figura 42. Ambos ultrapassam consideravelmente a meta de mínimo de 0,4 mm.

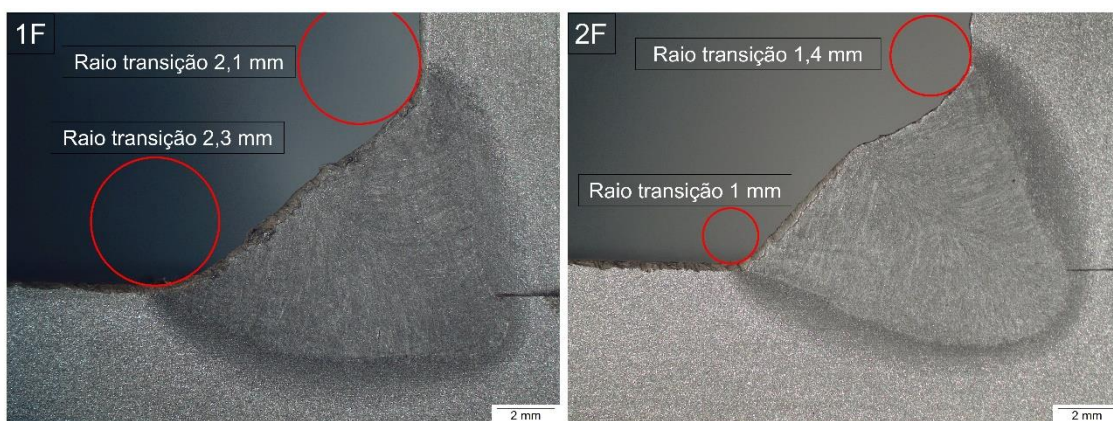


Figura 42: Dimensional dos raios de transição obtido nos testes in loco para cordão a5 nas posições 1F e 2F soldados após redefinição dos parâmetros de solda conforme Tabela 11.

Na Figura 43 são mostrados dimensionais de pernas. Percebe-se em ambos os casos que há um certo desvio entre os valores, mas que estão dentro dos limites definidos conforme Tabela 2.

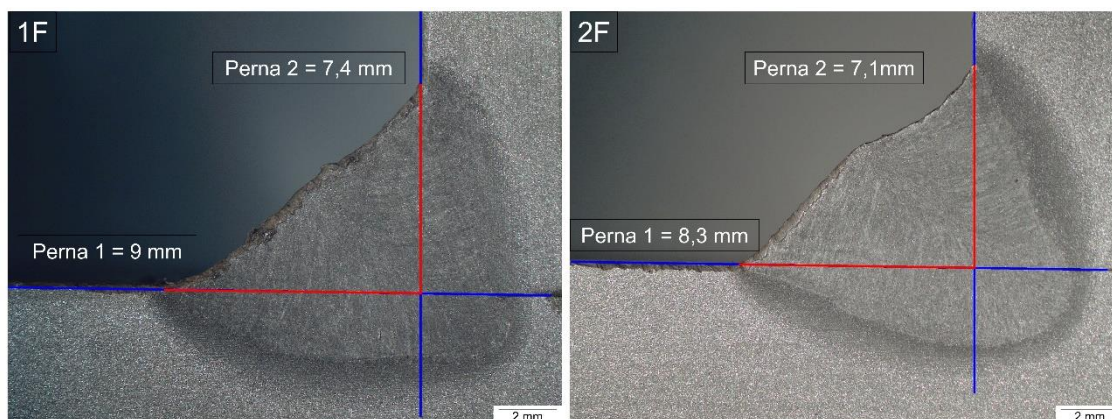


Figura 43: Dimensionais de pernas obtidos em testes *in loco* para cordão a5 nas posições 1F e 2F soldados após redefinição dos parâmetros de solda conforme Tabela 11.

Portanto o aspecto visual dos cordões e todas as dimensões estão conforme especificações/metast e podem ser implementados. De forma resumida, as dimensões encontradas estão inseridas na Tabela 11.

Tabela 12: Dimensões obtidas para cordão a5 e posições 1F e 2F após testes *in loco*.

Posição	Garganta [mm]	Penetração raiz [mm]	Raio transição 1 [mm]	Raio transição 2 [mm]	Perna 1 [mm]	Perna 2 [mm]
1F	5,4	2,8	2,3	2,1	9,0	7,4
2F	5,3	3,4	1,0	1,4	8,3	7,1

4.7 Dureza Vickers

Segundo o procedimento descrito na seção 3.2.3 foram avaliadas 3 amostras de cada processo, sendo A, B e C soldadas com processo PMC e D, E e F soldadas com processo pulsado convencional, ambos apenas na posição 2F. Com isso, foram traçados os perfis de dureza de cada processo a partir da média aritmética dos valores medidos para cada ponto e plotados os gráficos apresentados na Figura 44 contemplando os segmentos 1, 2 e 3 e Figura 45 para segmento 4.

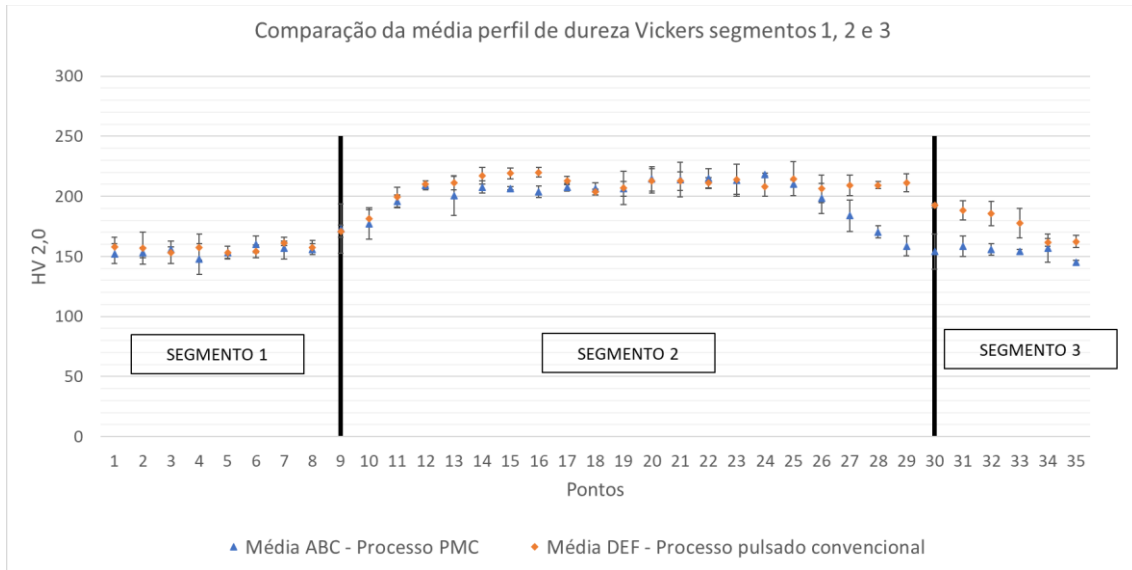


Figura 44: Comparação dos perfis de dureza Vickers (2,0kg) para as amostras soldadas com processo PMC e pulsado convencional - Segmentos 1, 2 e 3.

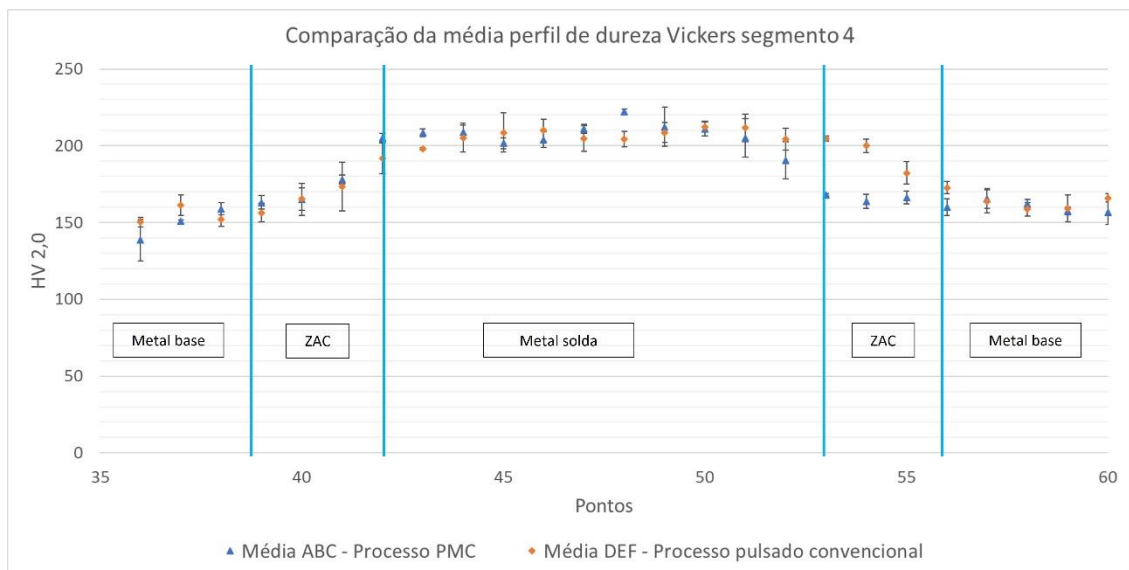


Figura 45: Comparação dos perfis de dureza Vickers (2,0kg) para as amostras soldadas com processo PMC e pulsado convencional – Segmento 4.

É possível observar que ambos os casos perfis muito similares, o que indica que as microestruturas também serão similares. Observa-se tanto no perfil dos segmentos 1, 2 e 3 quanto no segmento 4 que ambos começam com valores bastante parecidos e uma diferença aproximadamente entre os pontos 26 até 34

na Figura 44 e 51 até 36 na Figura 45. Essa diferença é explicada pois o processo PMC resultou em um cordão com garganta média de 5,3mm enquanto o processo pulsado convencional a garganta de solda média foi 5,8mm. Como o ponto inicial era sempre o mesmo, conforme explicado na Figura 28, o final do segmento 2 e início do segmento 3, assim como o final do segmento 4, estavam em regiões diferentes nas amostras A, B e C quando comparadas com amostras D, E e F, uma vez que o tamanho do cordão de solda e seu perfil de penetração são diferentes.

4.8 Micrografias

As amostras analisadas foram as amostras C, soldada pelo processo PMC, e D, soldada pelo processo pulsado convencional. O Objetivo foi observar possíveis diferenças entre as estruturas encontradas na ZAC e no metal de solda em ambos os casos. A Figura 46 abaixo mostra uma comparação entre as micrografias das amostras C e D da região do metal base.

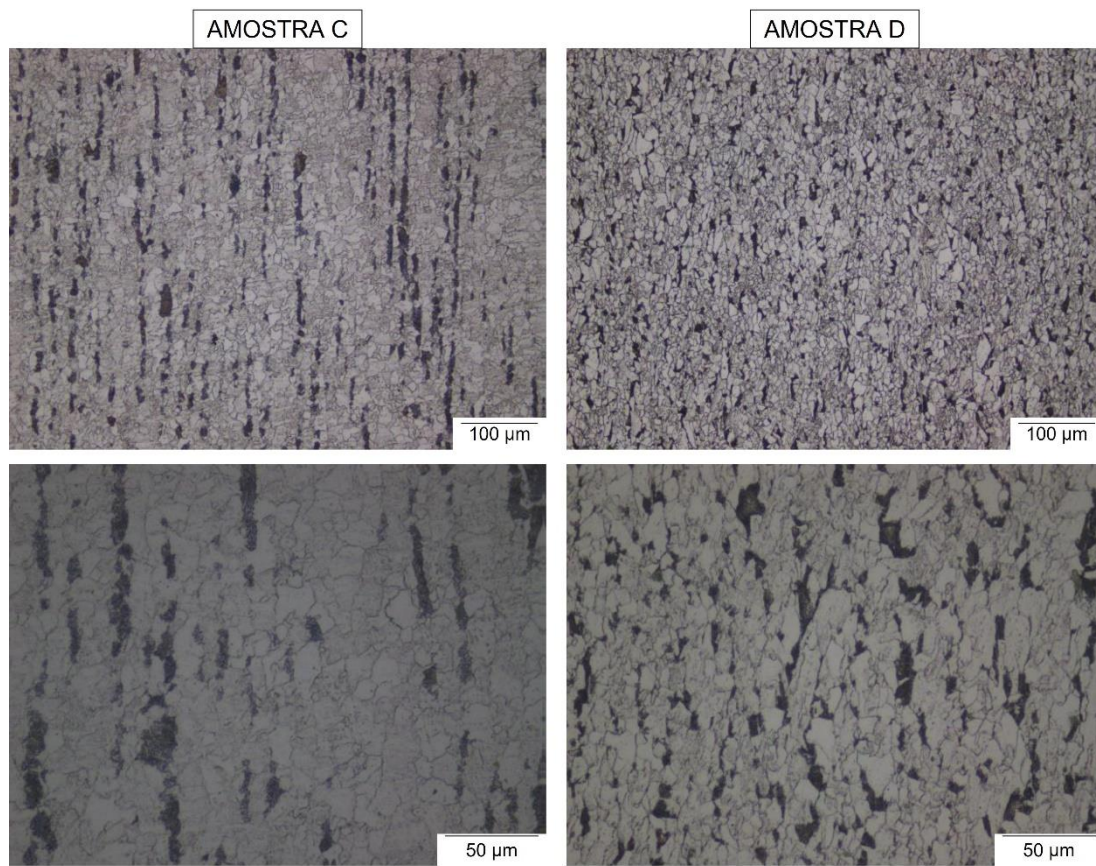


Figura 46: Micrografias das amostras C (PMC) e D (convencional) retiradas do metal base - Aço ASTM A572 G50.

Como esperado para esse tipo de aço a microestrutura é composta por ferrita e perlita [36] com ligeiras diferenças entre a morfologia dos grãos, uma vez que as chapas utilizadas para confecção dos corpos de prova não eram necessariamente oriundas de um mesmo lote de fabricação. É possível observar também que se encontram deformadas e orientadas, característica típica do processo de laminação.

A Figura 47 abaixo mostra micrografias das amostras C e D relativas à ZAC. Em ambos os casos se observa a presença de ferrita acicular e perlita fina, além de possivelmente bainita, mas a observação dessa e outras eventuais fases presentes só seria possível de ser feita com maior assertividade através de MEV. De qualquer forma, observa-se um predomínio de ferrita acicular nas imagens.

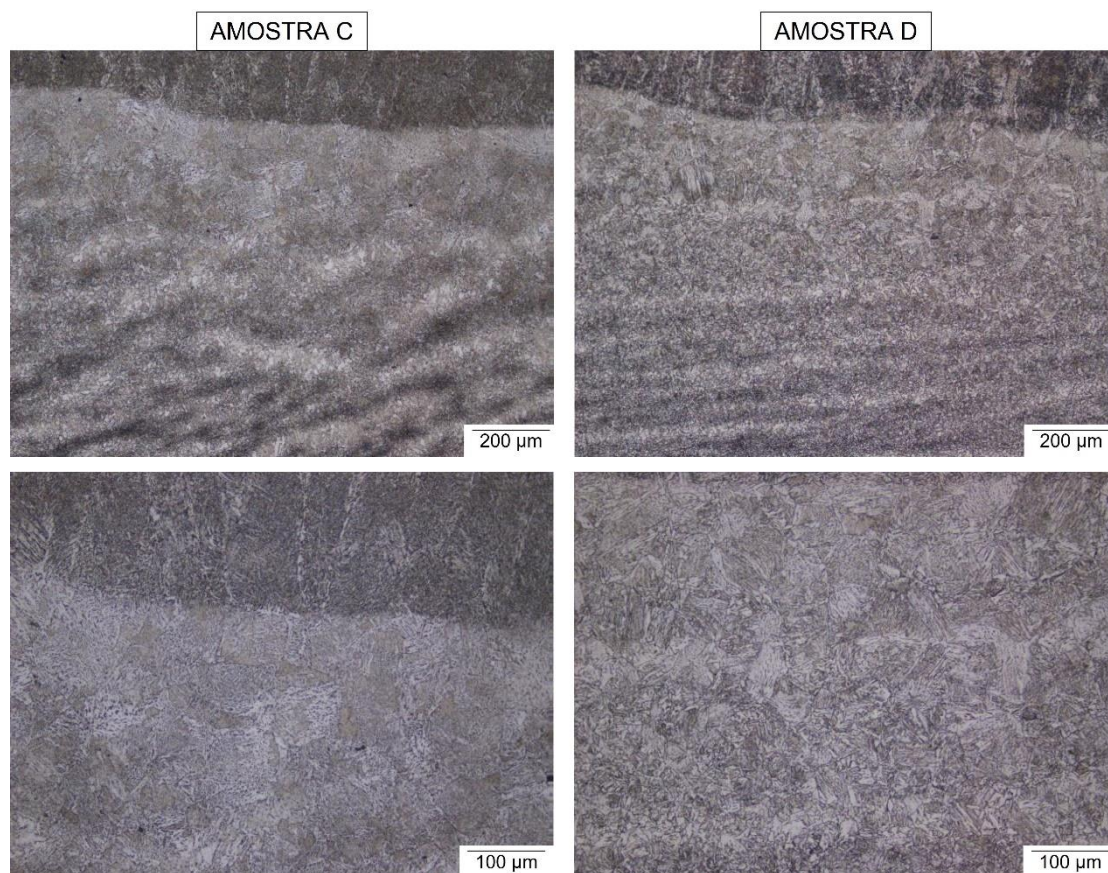


Figura 47: Micrografias das amostras C (PMC) e D (convencional) retiradas da ZAC da junta soldada.

Por fim, a Figura 48 mostra os aspectos microestruturais da região do metal de solda, que resulta de uma mistura do volume fundido do metal de base com o metal de adição.

Em ambos os casos se observa a presença predominante de ferrita acicular. Essa é uma microestrutura ferrítica presente em alguns aços, caracterizada por grãos pequenos, de formato agulhado, orientação aleatória e contornos de alto ângulo que resultam em uma maior resistência mecânica do aço [36]

Também se observa e a presença de algumas formações tipo Widmanstätten (destacada na imagem). Esses dois tipos de ferrita tendem a competir durante o resfriamento, sendo que a ferrita acicular tende a nuclear no centro do grão austenítico e a ferrita de Widmanstätten a partir do contorno do grão austenítico. Parece que uma maior fração de ferrita acicular, aliada à

presença de grãos refinados permitiu valores superiores de dureza caracterizando o metal de solda, conforme mostrado nas Figuras 44 e 45 [37]

Portanto tanto o processo pulsado convencional como o processo PMC resultaram em microestruturas bastante semelhantes, o que condiz com os resultados encontrados nos perfis de dureza mostrados no item 'Dureza Vickers'.

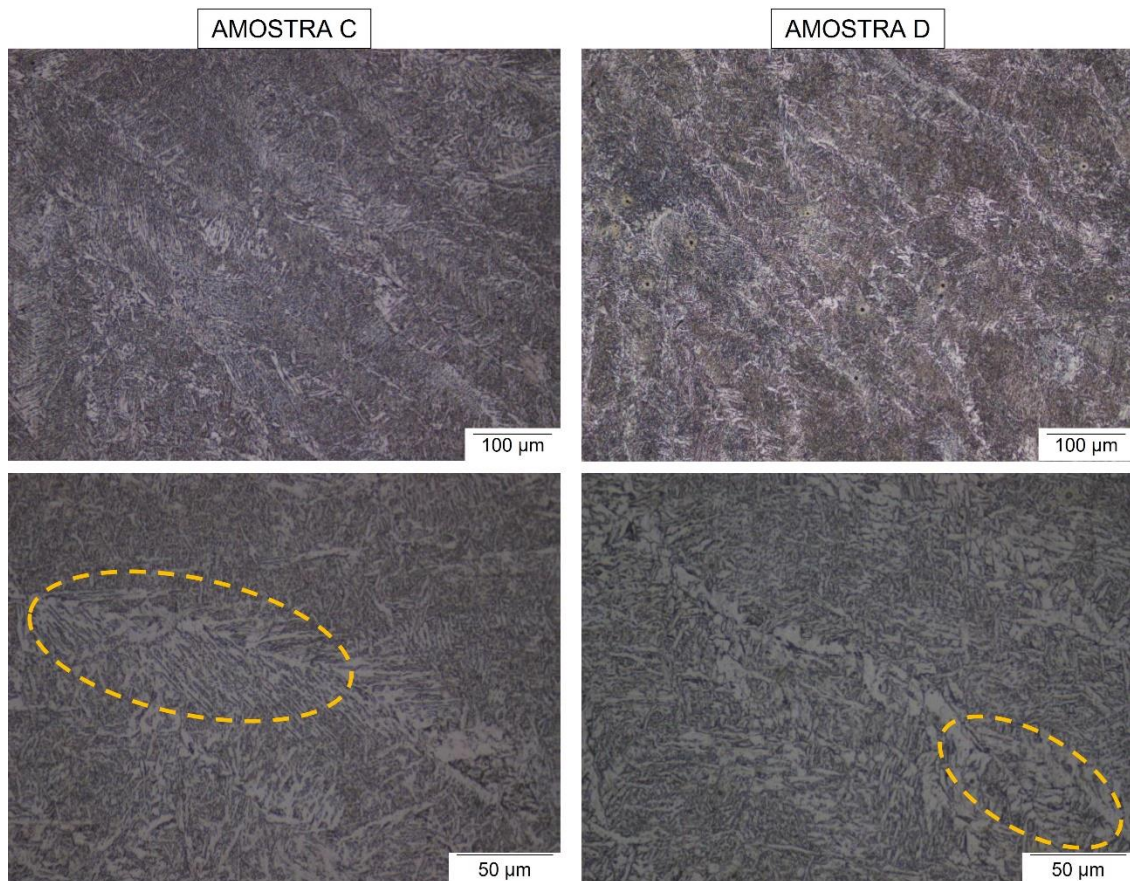


Figura 48: Micrografias das amostras C (PMC) e D (convencional) retiradas da região do metal de solda da junta soldada.

4.9 Tempos de ciclo

Com os dimensionais atingidos conforme requisitos nos corpos de prova, os parâmetros para velocidades de deslocamento atingidas de 53 cm/min para posição 1F e 50 cm/min para posição 2F foram implementados em produção, sendo que os resultados em peças produtivas se mostraram estáveis. Com isso, os novos tempos de ciclo são mostrados na Tabela 13.

Tabela 13: Tempos de ciclo otimizados após implementação do novo processo de soldagem PMC que permitiu maiores velocidades de deslocamento.

Modelo	Tempo ciclo inicial (Antes aumento velocidade de deslocamento)	Tempo ciclo final (Depois aumento velocidade de deslocamento)	Redução
Peça 1	02:22:00	01:53:42	-25%
Peça 2	02:00:00	01:28:44	-35%
Peça 3	02:02:13	01:29:11	-37%
Peça 4	03:22:42	02:37:07	-29%
		Média	-32%

5 CONCLUSÕES

Com os resultados obtidos nos testes *in loco* realizados pode-se inferir que:

- O processo de soldagem robotizada utilizado inicialmente, GMAW pulsado convencional, não era capaz de alcançar as metas desejadas por limitações tecnológicas;
- O resultado de velocidade de deslocamento de 53 cm/min na posição de soldagem 1F e 50 cm/min na 2F superou a meta estipulada de média de 46 cm/min considerando ambas as posições de soldagem;
- Novas tecnologias precisam de cuidado, estudo e acompanhamento próximos pois existem aspectos desconhecidos, e, portanto, não considerados, que podem influenciar negativamente nos resultados, mas isso não significa que não podem ser aplicadas. Cabe aos envolvidos analisar as ocorrências e buscar modos de contorná-las.
- Por fim, as comparações entre os perfis de dureza e as micrografias mostraram que não houve alterações significativas quando comparados o processo anterior, pulsado convencional, e o processo PMC, resultando em um aumento expressivo de aproximadamente 40% na velocidade de deslocamento da soldagem.

6 SUGESTÕES PARA FUTUROS TRABALHOS

Para trabalhos futuros e continuidade do tema sugere-se investigar a importância de cada parâmetro de processo individualmente e suas interações utilizando método *Design of Experiments*. Isso deve resultar em um melhor entendimento do processo e facilitará novas investigações como por exemplo aumento da bitola de arame ou a influência de outras misturas gasosas. Além disso é interessante comparar esse processo PMC com outros processos que possam ser aplicados em soldagem robotizada e visam redução tempo de ciclo, como por exemplo Hyperfill da empresa Lincoln electric, e outros que venham a ser desenvolvidos.

7 REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

1. SURI, R. It's about time: The competitive advantage of quick response manufacturing. New York: Productivity Press., 2010. 233 p.
2. WAINER, E.; BRANDI, S. D.; MELLO, F. D. H. D. Soldagem: processos e metalurgia. São Paulo: Edgard Blucher, 2015. 494 p. 10 v.
3. DOTY, W. D. Weldability of Constructional Steels-USA Viewpoint. Welding Research Supplement, Welding journal, n. 157, p. 49s-57s, feb. 1971.
4. DA SILVA, E. F.; SCOTTI, A. Análise do processo de soldagem MIG/MAG sob enfoque da qualidade da energia elétrica. In: CONFERÊNCIA BRASILEIRA DE QUALIDADE DA ENERGIA ELÉTRICA, 9., 2011, Cuiabá. Anais [...]. Cuiabá, MT: [s. n.], 2011. p. 266-271.
5. FISCHER, A. Estudo da influência dos parâmetros no processo de soldagem GMAW - Arco pulsado. 2011. 170 f. Tese (Doutorado em Engenharia Mecânica) - Universidade Federal de Minas Gerais, Belo Horizonte, 2011.
6. SCOTTI, A.; PONOMAREV, V. Soldagem MIG/MAG: Melhor entendimento melhor desempenho. São Paulo: Artliber, 2014. 288 p. 2 v.
7. MODENESI, P. J.; VILLANI, P.; BRACARENSE, A. Q. Soldagem: fundamentos e tecnologia. Belo Horizonte: Editora UFMG, 2017. 182 p.
8. SERVIÇO NACIONAL DE APRENDIZAGEM INDUSTRIAL (SÃO PAULO). Soldagem. São Paulo: Senai-SP, 2013. 720 p.
9. AMERICAN WELDING SOCIETY. Standard welding terms and definitions A3.0. Miami: AWS, 2011.
10. JN WELDING TOOLS. Parâmetros técnicos: posicionador para soldagem de motor de avanço. 2022. online. Disponível em: <http://jnweldingtools.com/4-5-motor-drive-welding-positioner.html>. Acesso em: 16 jul. 2022.
11. DELLAY, B. D. C. Análise da viabilidade de um projeto de aquisição de uma célula de soldagem robotizada. 2021; 46 f. TCC (Graduação em Engenharia de Produção) - Faculdade de Engenharia e Arquitetura, Universidade de Passo Fundo, Passo Fundo, 2021.

12. MATA, S. I. D. D. Análise do processo MIG pulsado-CA aplicado à soldagem do alumínio 5052-H34. 2017. 139 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Mecânica) - Instituto de Engenharia Mecânica, Universidade Federal de Itajubá, Itajubá, 2017.
13. VILARINHO, L. O. Desenvolvimento e avaliação de um algoritmo alternativo para soldagem MIG sinérgica de alumínio. 2000. 121 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Mecânica) - Centro de Ciências Exatas e Tecnologia, Universidade Federal de Uberlândia, Uberlândia, 2000.
14. CAMPOS, P. Fronius TPSi: Aplicação para alta velocidade de soldagem, 2020.
15. NASCIMENTO, D.; CAMPOS, P. "Tecnologia PMC". 10 de março de 2020. 1 transmissão (1:00:00). [Webinar]. Transmissão exclusiva - não disponível.
16. MEI, P. R.; DA COSTA E SILVA, A. L. V. Aços e ligas especiais. São Paulo: Blücher, 2010. 664 p.
17. ASTM A572/A 572M-04: Standard Specification for High-Strength Low-Alloy Columbium-Vanadium Structural Steel. [s. l.: s. n.], 2005.
18. BJÖRK, T.; SAMUELSSON, J.; MARQUIS, G. The Need for a weld Quality System for fatigue Loaded Structures. Weld World, v. 52, p. 34-46, 2008.
19. STENBERG, T. et al. Quality control and assurance in fabrication of welded structures. Welding World, v. 61, p. 1003-1016, 2017.
20. THE INTERNATIONAL ORGANIZATION FOR STANDARDIZATION. ISO 2553(en): welding and allied processes - symbolic representation on drawings - welded joints. Geneva: [s. n.], 2013.
21. ÅSTRAND, E. A framework for optimised welding of fatigue loaded structures applied to metal arc welding of fillet weld. 2016. 207 f. Tese (Doutorado em Engenharia de Materiais) - University West, Trollhättan, Suécia, 2016.
22. VOLVO GROUP. STD 181-0004: Fusion welding: weld classes and requirements Life-optimized welded structures Steel, thickness ≥ 3 mm. Search for Volvo Group Standards - ISSN 181-0004. online. 2016.

- Disponível em: <https://webstd.volvo.com/webstd/searchDoc>. Acesso em: 16 jul. 2022.
23. BARBADO, F. J. et al. Towards improved steel alloy designs for control of weld heat affected zone properties. In: INTERNATIONAL SYMPOSIUM ON Nb AND Mo ALLOYING IN HIGH PERFORMANCE STEELS, 2., 2013, Jeju Island. Proceedings [...]. Jeju Island, South Korea: KIM, 2013. p. 13.
 24. CALLISTER, W. D.; RETHWSCH, D. G. Ciência e engenharia de materiais: uma introdução. Tradução Sergio Murilo Stamile. 8. ed. Rio de Janeiro: LTC, 2012. 845 p.
 25. THE INTERNATIONAL ORGANIZATION FOR STANDARDIZATION. ISO E.N. 9015-1: Destructive tests on welds in metallic materials - hardness testing - Part 1: hardness test on arc welded joints. Geneva: [s. n.], 2001.
 26. THE INTERNATIONAL ORGANIZATION FOR STANDARDIZATION. ISO E.N. 9015-2: destructive tests on welds in metallic materials - hardness testing - Part 2: micro hardness testing on welded joints. Geneva: [s. n.], 2011.
 27. ROSSINI, L. F. S. Otimização do processo de soldagem robotizada tandem GMAW do aço ASTM A572 G50. 2018. 104 f. Dissertação (Mestrado em Ciência e Engenharia de Materiais) - Centro de Ciências Exatas e Tecnologia, Universidade Federal de São Carlos, São Carlos, 2018.
 28. JORGE, J. C. F. et al. Propriedades mecânicas e microestruturais de juntas soldadas pelo processo a arco submerso com elevado aporte térmico. Soldagem & Inspeção, v. 20, p. 347-358, out. 2015.
 29. DE ANDRADE, G. E. V.; MARRA, B. A.; MELLO, C. H. P. Análise da Aplicação Conjunta das Técnicas SIPOC, Fluxograma e FTA em uma Empresa de Médio Porte. In: ENCONTRO NACIONAL DE ENGENHARIA DE PRODUÇÃO, 32., 2012, Bento Gonçalves. Anais [...]. Bento Gonçalves, RS: [s. n.]. 2012. p. 14.
 30. TEIXEIRA, A. L. A. Mapeamento de processos: teoria e caso ilustrativo. 2013. 22 f. Relatório de Iniciação Científica (Gestão de Negócios) - Departamento de Engenharia Industrial, PUC Rio, Rio de Janeiro, 2013.

31. D'AMELIO, R. The basics of process mapping. New York: Productivity Press, 1996. 80 p.
32. HUNT, D. V. Process Mapping: how to reengineer your business processes. New Jersey: Wiley, 1996. 288 p.
33. AMERICAN WELDING SOCIETY. Specification for Steel Electrodes and Rods for Gas Shielded Arc Welding A5.18. Miami: AWS, 1998.
34. SLACK, N. et al. Administração da Produção. 10. ed. São Paulo: Atlas, 1999. 1 v.
35. SPEAR, S.; BOWEN, H. K. Decoding the DNA of the Toyota production system. Harvard Business Review, p. 97-106, sep./oct. 1999.
36. BHADESHIA, H.; HONEYCOMBE, R. Steels: Microstructure and Properties. 4. ed. Oxford: Butterworth-Heinemann, 2017. 488 p.
37. LEVINE, E.; HILL, D. C. Structure-property relationships in low c weld metal. Metallurgical and Materials Transactions A, v. 8, n. 9, p. 1453 - 1463, sep. 1977.