

UNIVERSIDADE TECNOLÓGICA FEDERAL DO PARANÁ
DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA MECÂNICA
ENGENHARIA MECÂNICA

PAULO HENRIQUE TOALDO

**SOLDAGEM DE AÇO INOXIDÁVEL MARTENSÍTICO CA6NM POR
PROCESSO GMAW COM CORRENTE ALTERNADA**

TRABALHO DE CONCLUSÃO DE CURSO

PONTA GROSSA

2019

PAULO HENRIQUE TOALDO

**SOLDAGEM DE AÇO INOXIDÁVEL MARTENSÍTICO CA6NM POR
PROCESSO GMAW COM CORRENTE ALTERNADA**

Trabalho de Conclusão de apresentada como requisito parcial à obtenção do título de Bacharel em engenharia mecânica, do departamento de mecânica da Universidade Tecnológica Federal do Paraná.

Orientador: Prof. Dr. Anderson Geraldo Marenda Pukasiewicz.

Coorientador: Eng. Me. Rodolpho Fernando Váz.

PONTA GROSSA

2019



Ministério da Educação
Universidade Tecnológica Federal do Paraná
Câmpus Ponta Grossa
Diretoria de Graduação e Educação Profissional
Departamento Acadêmico de Mecânica
Bacharelado em Engenharia Mecânica



TERMO DE APROVAÇÃO

**SOLDAGEM DE AÇO INOXIDÁVEL MARTENSÍTICO CA6NM POR PROCESSO
GMAW COM CORRENTE ALTERNADA**

por

PAULO HENRIQUE TOALDO

Este Trabalho de Conclusão de Curso foi apresentado em 6 de maio de 2019 como requisito parcial para a obtenção do título de Bacharel em Engenharia Mecânica. O candidato foi arguido pela Banca Examinadora composta pelos professores abaixo assinados. Após deliberação, a Banca Examinadora considerou o trabalho aprovado.

Prof. Dr. Anderson Geraldo Marena Pukasiewicz
Orientador

Prof. Dr. Roger Navarro Verastegui
Membro Titular

Prof. Dr. Luciano Augusto Lourencato
Membro Titular

Prof. Dr. Marcos Eduardo Soares

Responsável pelos TCC

**Prof. Dr. Marcelo Vasconcelos de
Carvalho**

Coordenador do Curso

A Folha de Aprovação assinada encontra-se na coordenação do curso.

AGRADECIMENTOS

Agradeço primeiramente a Deus (a força maior), por me dar força e energia para a superação dos obstáculos diários.

A minha família, sem a qual eu não teria dado sequer um passo. A minha mãe Marly, meu pai Ciro, e minha irmã Ana que, apesar de todas as tribulações no meio do caminho, sempre me incentivaram e apoiaram em todas as fases dessa trajetória. A minha vó Wonni e meus padrinhos Carli e Lori que, mesmo longe, sempre torceram e me ajudaram sempre que possível.

Ao meu orientador e amigo Dr. Anderson Geraldo Marena Pukasiewicz, pela introdução ao universo da soldagem, pelas oportunidades fornecidas, conversas esclarecedoras, caronas, viagens e acima de tudo dedicação e auxílio no desenvolvimento deste trabalho.

Ao meu coorientador, amigo e ex-chefe Eng. Ms. Rodolpho Fernando Vaz, o qual não poupou esforços para sempre estar a par da estruturação da pesquisa, fornecendo material de estudo, esclarecendo dúvidas e me recebendo nos Institutos Lactec para direcionamento do trabalho, sempre de maneira muito sábia.

Ao professor e amigo Roger Verastégui pelas inúmeras conversas no laboratório de soldagem que, por mais que as vezes dispersas, sempre auxiliaram de alguma maneira na condução do estudo.

À Universidade Tecnológica Federal do Paraná Câmpus Ponta Grossa, ao Departamento de Engenharia Mecânica pela disponibilidade de toda sua estrutura durante o processo.

Aos Institutos Lactec, empresa na qual tive o prazer de estagiar e aprender com pessoas maravilhosas, fornecendo a máquina de soldagem e um pedaço de uma pá de rotor de turbina real para a realização do trabalho.

A todos meus amigos da engenharia, especialmente a Arthur Fauth, Gabriel Trelha e Gustavo Trelha, cujo não pouparam esforços para me ajudar nas horas que mais precisei.

Ao BAJA Gralha Azul, o qual me deu oportunidade de sempre aprimorar meus conhecimentos práticos no universo da soldagem.

RESUMO

TOALDO, Paulo H. **Soldagem de Aço Inoxidável Martensítico CA6NM por Processo GMAW com Corrente Alternada**. 2019. 54 p. Trabalho de Conclusão de Curso Bacharelado em Engenharia Mecânica - Universidade Tecnológica Federal do Paraná. Ponta Grossa, 2019.

O efeito abrasivo da água e erosão por cavitação são mecanismos que levam o desgaste em pás de rotores de turbinas em usinas hidroelétricas, cujas são responsáveis por grande parte da produção energética do Brasil. Recentemente, várias tecnologias são empregadas para manutenção mais eficiente de tais equipamentos. Em processos de recuperação de pás de rotores de turbinas, são efetuados empilhamentos de cordões de solda para preenchimento das partes desbastadas. Um grande problema da manutenção dessas pás de rotores é a alta transferência de calor para o metal de base, o qual pode ocasionar perdas de propriedades mecânicas, precisão dimensional, elementos de liga, etc. Uma técnica para minimizar essa transferência de calor é utilizar processos de soldagem por corrente alternada, a qual pode ser uma alternativa viável para a diminuição da diluição dos cordões de solda, garantindo um aporte térmico menor. Utilizou-se um pedaço de pá de rotor de turbina hidroelétrica como metal de base, caracterizado como aço inoxidável martensítico CA6NM, cortado em várias chapas de tamanhos iguais. Para a seleção dos parâmetros de soldagem em corrente alternada, utilizou-se a metodologia CCC, variando velocidade de alimentação de arame, corrente de alta e corrente de baixa. Observou-se o aumento da diluição conforme o aumento da velocidade de alimentação de arame, provocando dessa forma um aumento da zona termicamente afetada. Velocidades de alimentação de arame muito baixas provocaram uma diluição nula – falta de fusão – do cordão de solda para com o metal de base. Dessa maneira, busca-se na soldagem MIG/MAG por CA um aporte térmico menor em relação aos processos MIG/MAG convencionais.

Palavras-chave: Soldagem, Corrente Alternada, CA6NM, Diluição.

ABSTRACT

TOALDO, Paulo H. **Martensitic CA6NM Stainless Steel Welding by GMAW process with Alternate Current.** 2019. 54 p. Course's Conclusion Paper in Mechanical Engineering – Parana's Federal Technology University – Paraná. Ponta Grossa, 2019.

The abrasive effect of water and cavitation erosion are the mechanisms that wear of turbine rotor blades in hydroelectric plants, that account for the majority of the electricity generated in Brazil. Recently, several technologies of equipment maintenance and efficiency. In turbine rotor blade recovery movements, they are carried out in weld bead packs to fill in roughened parts. A major problem of rotor blade maintenance is a heat transfer medium for the base metal, alloying elements, mechanical strength, roughing resistance, etc. A technique for the low heat transfer is the use of alternating current welding processes, guaranteeing a viable alternative for the dilution of the weld beads, guaranteeing a lower heating. Used a piece of hydraulic turbine rotor (CA6NM stainless steel) as base metal cut into several equal sized parts. For a selection of welding parameters in alternating current, a CCC methodology is used to design the experiment, changing wire feed speed, high current and low current. The increase of the dilution was observed as the feed velocity of the wire increased, causing an increase of the thermally affected zone. Very low wire feed speeds caused zero dilution – lack of fusion - of the weld bead to the base metal. Therefore, GMAW CA process should provide less heat transfer than GMAW standard processes.

Keywords: Welding, Alternate Current, CA6NM, Dilution.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 - Processo de soldagem MIG/MAG.....	15
Figura 2 – Fluxo de elétrons em função da polaridade	16
Figura 3 - Formato de onda modelada para corrente para 50% positiva 50% negativa	17
Figura 4 - Modos de transferência metálica	21
Figura 5 – Modos de transferência metálica em função de tensão e corrente.	21
Figura 6 - Diagrama de fases ferro-cromo-níquel, para razão cromo/níquel igual a 3:1	24
Figura 7 – Fluxograma de etapas da metodologia para alcance dos objetivos	25
Figura 8 - Retalho de rotor de turbina	26
Figura 9 - Chapas de CA6NM prontas para deposição	26
Figura 10 - Máquina de Solda MIG/MAG utilizada	27
Figura 11 - Tartilope V1 posicionado com a tocha de soldagem MIG//MAG	28
Figura 12 - Representação do DOE-CCC	29
Figura 13 - Ângulo de molhabilidade. a) Ângulo positivo b) Ângulo negativo.....	32
Figura 14 - Cordões de solda finalizados	34
Figura 15 - Ensaio de líquidos penetrantes	35
Figura 16 – Geometria dos cordões de parâmetros a) 3 b) 7 c) 11 d) 17.....	37
Figura 17 - Geometria dos cordões em 50x	38
Figura 18 - Exemplo de medições de microdureza Vickers na amostra 01	43
Figura 19 – Análise comparativa de ZTA com gás de proteção Ar+25%CO ₂	49
Figura 20 - Análise comparativa de espessura da ZTA com gás de proteção Ar puro.	49

LISTA DE GRÁFICOS

Gráfico 1 - Molhabilidade em função de velocidade de alimentação do arame e corrente positiva	39
Gráfico 2 - Diluição em função de velocidade de alimentação do arame corrente positiva	40
Gráfico 3 - Reforço de cordão em função de velocidade de alimentação do arame corrente positiva	41
Gráfico 4 - Largura de cordão em função da velocidade de alimentação do arame corrente positiva	42
Gráfico 5 - Microdureza do parâmetro central (média)	43
Gráfico 6 - Perfil de Microdureza Vickers nas amostras 6 e 13.....	44
Gráfico 7 - Mapeamento de Microdureza Vickers dos parâmetros 2, 5, 7, 9, 17, 20, 10, 11, 14 e 18.	45

LISTA DE ABREVIACOES

ACI	<i>Alloy Casting Institute</i>
ASTM	<i>American Society for Testing and Materials</i>
CA	Corrente Alternada
CC ⁺	Corrente Contínua positiva
CC ⁻	Corrente Contínua negativa
CCC	<i>Central Composite Circunscrip</i>
DOE	<i>Design Of Experiment</i>
GMAW	<i>Gas Metal Arc Welding</i>
GTAW	<i>Gas Tungsten Arc Welding</i>
LP	Líquidos Penetrantes
MAG	Metal Active Gas
MIG	Metal Inert Gas
UTFPR	Universidade Tecnológica Federal do Paraná
ZF	Zona Fundida
ZTA	Zona Termicamente Afetada

SUMÁRIO

1 INTRODUÇÃO	11
1.1 JUSTIFICATIVA	12
1.2 OBJETIVO GERAL	12
1.3 OBJETIVOS ESPECÍFICOS	12
2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA	14
2.1 SOLDAGEM.....	14
2.2 SOLDAGEM MIG/MAG	15
2.2.1 Por Corrente Contínua (MIG-CC)	16
2.2.2 Por Corrente Alternada (MIG-CA).....	17
2.2.3 MIG/MAG Pulsado (MIG/MAG-P)	18
2.2.4 MIG/MAG com pulsação térmica (Duplo pulso)	18
2.3 PARÂMETROS DO PROCESSO DE SOLDAGEM	19
2.4 ABERTURA DE ARCO E TRANSFERÊNCIA METÁLICA.....	20
2.5 AÇO INOXIDÁVEL.....	22
2.5.1 Aço Inoxidável Martensítico Macio CA6NM	23
3 MATERIAIS E MÉTODOS.....	25
3.1 PREPARAÇÃO DOS CORPOS DE PROVA	25
3.2 SELEÇÃO DE PARÂMETROS	28
3.3 PREPARAÇÃO METALOGRÁFICA.....	30
3.4 ATAQUE QUÍMICO.....	31
3.5 DILUIÇÃO DOS CORDÕES	31
3.6 GEOMETRIA DOS CORDÕES.....	31
3.7 MOLHABILIDADE DOS CORDÕES	32
3.8 ESTUDO DA ZONA TERMICAMENTE AFETADA	32
3.9 ENSAIO DE MICRODUREZA	33
4 RESULTADOS OBTIDOS E DISCUSSÃO	34
4.1 INSPEÇÃO VISUAL.....	34
4.2 ANÁLISE DA GEOMETRIA DOS CORDÕES.....	35
4.3 MICRODUREZA DOS CORDÕES	42
4.4 COMPARAÇÃO DE RESULTADOS	48
5 CONCLUSÕES	51
5.1 RECOMENDAÇÕES PARA TRABALHOS FUTUROS.....	52
6. REFERÊNCIAS.....	53

1 INTRODUÇÃO

O domínio e estudo de processos de soldagem com baixo aporte térmico é uma tendência comumente associada às aplicações como a soldagem de aços inoxidáveis martensíticos, a qual o risco da perda dos elementos de liga e da geração de tensões residuais comprometem a soldagem. Controlar parâmetros como o aporte térmico e aquecimento da base constitui em não apenas um diferencial, mas muitas vezes algo necessário para haver o processo de soldagem de ligas inoxidáveis martensíticas. Aplicações como a recuperação de pás de rotores de turbinas e/ou compressores em indústrias de obtenção de energia pode ser o limiar de um progresso econômico, onde os prejuízos decorrentes da troca total desses componentes são significativos.

Controlar e minimizar o calor transferido para a peça é de grande vantagem para quando se é necessário altas taxas de deposição de material sem prejudicar o metal base e os parâmetros de aporte térmico e quantidade de calor transferido para o metal base é de extrema importância para tal.

O método de soldagem por arco elétrico com gás inerte de proteção (MIG), conhecido no mundo como *Gas Metal Arc Welding* (GMAW), é comumente aplicado pelo método da utilização de corrente contínua (CC⁺) por ser estável, de bom acabamento e amplamente conhecido e desenvolvido pela indústria. Porém, seus parâmetros ótimos se concentram em alta penetração e um excessivo aquecimento do metal base, causando muitas vezes deformação do material base, excesso de penetração, tensões residuais desnecessárias e com isso, a dificuldade de soldar chapas de menor espessura. Outro método que pode ser adotado em substituição ao CC⁺ é o de corrente alternada (CA).

O uso da corrente alternada no processo MIG/MAG é uma derivada do processo CC⁺, apenas trabalhando com variação controlada de polaridades de corrente, negativa e positiva. Desse modo, o calor transferido para o metal base é consideravelmente reduzido.

A aplicação desse método é de grande vantagem na soldagem de aços inoxidáveis martensíticos, utilizados na construção de turbinas hidráulicas e a gás, indústrias petroquímicas, corpos de válvulas, cones e discos de compressores, além de uma variedade de elementos estruturais de aviões e motores. Uma vez que os aços inoxidáveis martensíticos possuem baixa soldabilidade, altas tendências de

trincas a frio e baixa tenacidade das uniões soldadas, sendo de extrema importância o controle do aporte térmico da soldagem, minimizando sempre que possível.

Vale salientar que o processo de soldagem MIG/MAG com CA ainda é introdutório nas pesquisas, devido os equipamentos para tal estudo possuir uma tecnologia elevada e, desse modo, haver o desinteresse das indústrias mais populares.

Desta forma, este trabalho visa verificar o aporte térmico da soldagem MIG/MAG com CA

1.1 JUSTIFICATIVA

Na manutenção de pás de rotores de turbinas de usinas hidroelétricas é comum a retirada de trincas e falhas de geometria por processos de desbaste como esmerilhamento e lixamento. Logo após, aplica-se processos de soldagem para preenchimento do material desbastado.

Processos de soldagem MIG/MAG convencionais transferem para a peça elevada quantidade de calor, algo danoso para a peça a ser reparada, devido perdas de propriedades mecânicas, precisão dimensionale até mesmo elementos de liga.

O trabalho é voltado no processo de soldagem MIG/MAG com CA no material aço inoxidável martensítico, estudando sua transferência de calor para o metal de base.

1.2 OBJETIVO GERAL

Estudar a tecnologia da soldagem MIG/MAG com CA no aço inoxidável martensítico CA6NM, entendendo e explorando melhor essa alternativa tecnológica para demandas industriais que exigem baixa transferência de calor para o metal de base.

1.3 OBJETIVOS ESPECÍFICOS

Avaliar parâmetros de soldagem influenciadores da zona termicamente afetada através de propriedades como:

- Diluição do cordão de solda no metal base;
- Mapeamento da zona termicamente afetada através de medições de microdureza Vickers;
- Reforço do cordão;
- Largura do cordão e
- Molhabilidade da seção transversal do cordão de solda.

2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

2.1 SOLDAGEM

O processo de soldagem é considerado um método de união de dois materiais por fusão. Muitos processos de soldagem ou variações destes são usados para a deposição de materiais sobre superfícies, recuperando peças desgastadas ou formando revestimentos superficiais com características divergentes do metal base. (MODENESI e MARQUES, 2000).

Outra definição do processo de soldagem é a operação que tem por objetivo obter a coalescência localizada produzida pelo aquecimento até uma temperatura adequada, com ou sem a aplicação de pressão e de metal de adição. (AMERICAN WELDING SOCIETY , 2001).

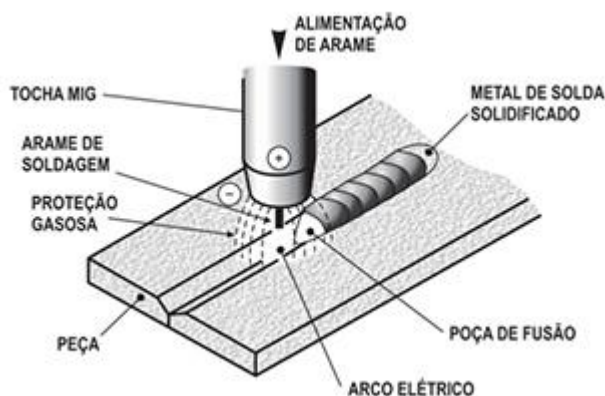
Com a finalidade de se obter essa união dos materiais pelo mecanismo de fusão, a partir do séc XIX desenvolveu-se vários métodos (MODENESI e MARQUES, 2000):

- Soldagem por Eletrodo Revestido;
- Soldagem *Gas Tungsten Arc Welding* (GTAW), o qual será o estudo do presente trabalho;
- Soldagem *Gas Metal Arc Welding* (GMAW);
- Soldagem com Arames tubulares;
- Soldagem ao Arco Submerso;
- Soldagem a Plasma;
- Soldagem de Pinos;
- Soldagem Eletro-escória;
- Soldagem Oxi-Gás;
- Soldagem por Feixe de elétrons;
- Soldagem a Laser.

2.2 SOLDAGEM MIG/MAG

A soldagem por MIG/MAG, também titulada de GMAW (acrograma oriundo da língua inglesa *Gas Metal Arc Welding*), é um processo da soldagem fundamentado na fonte de calor de um arco elétrico mantido entre a extremidade de um arame consumível, alimentado continuamente, e a peça a soldar, juntamente com uma atmosfera protetora de gás inerte ou ativo, demonstrado na Figura 1 (SCOTTI e PONOMAREV, 2014). A nomenclatura MIG/MAG é um acrograma advindo da língua inglesa, no qual MIG significa *Metal Inert Gas* (utiliza-se gás inerte como atmosfera protetora) e MAG *Metal Active Gas* (utiliza-se gás ativo como atmosfera protetora).

Figura 1 - Processo de soldagem MIG/MAG



Fonte: (ESAB, 2005)

Devido sua facilidade de automatização, quando o movimento da tocha é feito por máquinas programadas, o processo de soldagem MIG/MAG é de grande produtividade, característica essa de grande importância para a indústria, sendo altamente apreciada pela mesma. Dentro da soldagem MIG/MAG existem quatro diferentes tipos de processos de soldagem, classificados em (SCOTTI e PONOMAREV, 2014):

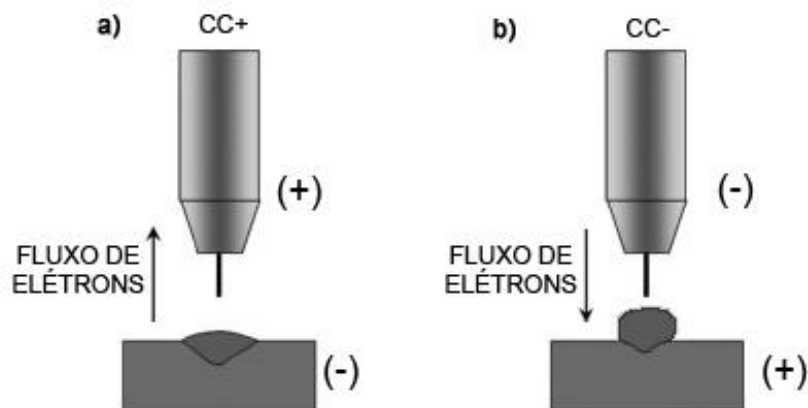
- Corrente Contínua (CC);
- Corrente Alternada (CA);
- Pulsado;
- Pulsado térmico.

2.2.1 Por Corrente Contínua (MIG-CC)

Por definição, uma corrente elétrica é um fluxo de cargas elétricas em movimento. Desse modo, uma corrente contínua nada mais é que um fluxo constante de elétrons de condução em apenas uma direção, se movendo através de condutores metálicos, como fios de cobre, por exemplo (HALLIDAY, RESNICK e WALKER, 2009). Ela existe se, e somente se, há uma diferença de potencial dentro do sistema onde se encontra o fluxo.

O fato da corrente contínua ser positiva (CC+) ou ser negativa (CC-) acarreta na direção do fluxo de elétrons, visualizado na Figura 2. Em CC+ o eletrodo de soldagem atua na polaridade positiva e em CC- o metal de base atua na polaridade positiva. (TALKINGTON, 1998). É salientado na teoria que, no universo da soldagem, utiliza-se a corrente real, ou seja, elétrons viajam do cátodo para o ânodo, diferente da corrente convencional, usualmente estudado nas academias. Desta forma, podemos analisar esse fluxo de elétrons na Figura 2 (SCOTTI e PONOMAREV, 2014).

Figura 2 – Fluxo de elétrons em função da polaridade



Fonte: Adaptado de (TALKINGTON, 1998)

Vários estudos debatem as vantagens e desvantagens de CC+ e CC-, porém é convencional a utilização do processo com eletrodo ao polo positivo, conhecido também como polaridade inversa. Pesquisas anteriores demonstram que, em CC+ consegue-se grande profundidade de penetração, boa estabilidade do arco e da transferência, quantidade de respingos relativamente pequena, além da possibilidade de soldar com os diferentes modos de transferência metálica (curto circuito, globular e spray). Em CC- encontra-se características como baixa penetração, alta taxa de

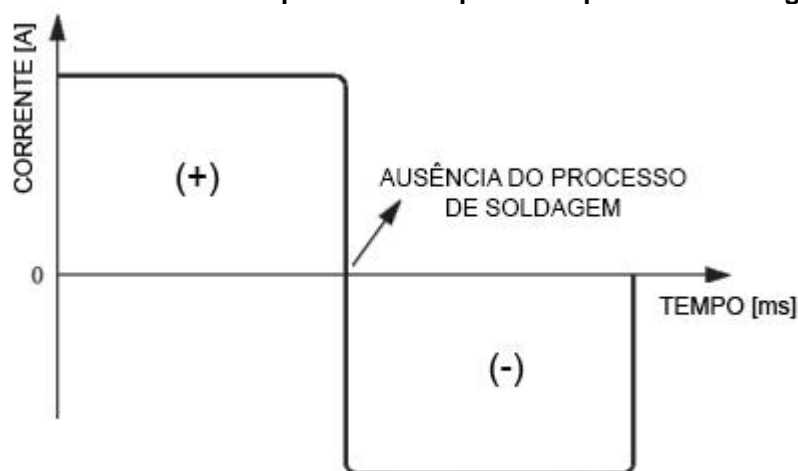
fusão de arame (comparação à CC+), menor quantidade de calor transferido à peça e quantidade de respingos relativamente alta. (SOUZA, RESENDE e SCOTTI, 2009)

2.2.2 Por Corrente Alternada (MIG-CA)

Analogamente à corrente contínua, a corrente alternada funciona da mesma maneira, porém o fluxo de elétrons agora trabalhando em duas direções de fluxo, sendo adotados sinais positivos para a ida e positivos para a volta, por exemplo. Esse valor de fluxo alterna senoidalmente com o tempo, trocando de sentido várias vezes por segundo. (HALLIDAY, RESNICK e WALKER, 2009).

O processo de soldagem MIG/MAG CA é uma variação do processo MIG/MAG convencional em corrente CC, no qual o eletrodo atua como cátodo. Uma característica importante do processo MIG/MAG CA é o eletrodo atuar como ora como cátodo, ora como ânodo, no qual há aumento da taxa de deposição e redução do aporte térmico (SCOTTI e MONTEIRO, 2012). Tal procedimento é demonstrado na Figura 3, na qual é possível um momento infinitesimal no qual processo de soldagem não ocorre, devido a diferença de potencial ser nula. Vale salientar que a imagem está modelada para 50% de distribuição de polaridade apenas para motivos didáticos.

Figura 3 - Formato de onda modelada para corrente para 50% positiva 50% negativa



Fonte: Autoria própria

Assim, onde penetração excessiva se torna um fator crítico, como na soldagem de chapas finas ou de aços de liga, a escolha de corrente alternada pode se tornar viável. (TALKINGTON, 1998).

2.2.3 MIG/MAG Pulsado (MIG/MAG-P)

Considerado um processo recente, o MIG/MAG pulsado foi desenvolvido com o a finalidade de reunir as melhores características das versões por curto-circuito e goticular em um só processo, obtendo uma transferência metálica estável com um valor de corrente relativamente baixa (ver tópico 2.4 sobre transferência metálica). Isto se dá pelo fato do sinal de corrente de soldagem ser modulado para o controle da transferência das gotas. A essa modulação dá-se o nome de corrente de base e corrente de pulso (SCOTTI e PONOMAREV, 2014).

A corrente de base tem como objetivo manter o arco aberto com uma baixa energia. Já a corrente de pulso tem como objetivo formar a gota na ponta do eletrodo (arame) e em seguida atuar no seu destacamento devido a um surto de forças eletromagnéticas (SCOTTI e PONOMAREV, 2014).

Em suma, uma soldagem do tipo MIG/MAG-P faz o modelamento da corrente para que o processo fique mais estável e uniforme, podendo ser utilizado em quaisquer posições de soldagem. Este processo de soldagem é para baixos valores de corrente.

2.2.4 MIG/MAG com pulsação térmica (Duplo pulso)

Utilizado com uma maior frequência nos processos TIG na soldagem de alumínio, o processo de pulsação térmica começou a ser utilizado a partir do final dos anos 90 no processo MIG/MAG, sendo chamado de MIG/MAG pulsado por pulso duplo. Assim, é aliado o processo MIG/MAG-P e juntamente com a pulsação térmica.

O termo pulsação térmica é definido por Scotti e Ponomarev como a mudança proposital e cíclica da intensidade do aporte de calor a baixas frequências (0,5Hz a 5Hz), com o intuito de controlar a poça de fusão. Desse modo, enquanto o aporte de calor é maior, há uma efetiva fusão do metal de base, mas quando o aporte de calor diminui, a tensão superficial e a viscosidade do material da poça aumentam, evitando o escorrimento da poça. (SCOTTI e PONOMAREV, 2014).

É importante constar que, o cliente final acredita que o aspecto escamado da soldagem TIG leva a maior resistência mecânica, o qual só é possível com processo

GMAW com duplo pulso. Isto se dá pelo fato da variação cíclica de calor da poça, dependendo da combinação dos parâmetros. (SCOTTI e PONOMAREV, 2014)

2.3 PARÂMETROS DO PROCESSO DE SOLDAGEM

É de suma importância a necessidade de conhecer a regulagem dos parâmetros de soldagem para se obter uma boa estabilidade de arco e, em consequência, uma soldagem de qualidade superior.

De acordo com Scotti e Monteiro, os parâmetros de entrada da soldagem MIG/MAG CA devem ser (SCOTTI e MONTEIRO, 2012):

- A corrente média no polo positivo;
- O valor de percentual de eletrodo no negativo;
- O gás de proteção;
- A composição e diâmetro do arame-eletrodo.

Com a finalidade de haver maior estabilidade de soldagem com eletrodos consumíveis, há a necessidade da existência de óxidos para haver emissão catódica. Para isso é necessário haver uma atmosfera de proteção, feita por gases. Estudos comprovam que há uma maior estabilidade das soldagens com eletrodos consumíveis com proteção gasosa se o gás de proteção contiver pequenas adições de oxigênio em sua composição, garantindo a existência de óxidos para a haver emissão catódica (SCOTTI e PONOMAREV, 2014).

A importância dos gases de proteção é de elevada importância para com o calor distribuído, podendo influenciar na maneira como os gradientes de temperatura se comportam. Estudos demonstram que, utilizar Argônio e menos de 5% O₂ ou CO₂ como gás de proteção em soldagens MIG/MAG utilizando CC+, transportam em 30% do calor gerado no arco concentrado no eletrodo e o restante na peça (TALKINGTON, 1998).

2.4 ABERTURA DE ARCO E TRANSFERÊNCIA METÁLICA

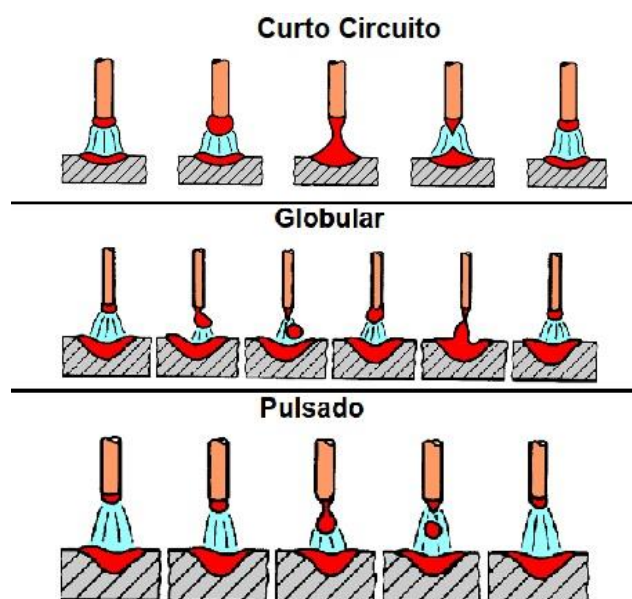
Em soldagens com eletrodo consumível os elétrons são emitidos devido ao fenômeno de emissão catódica. Dessa maneira a direção do fluxo de elétrons, explicada anteriormente, é de extrema importância uma vez que este define a temperatura do eletrodo e metal base. Correntes positivas aquecem mais o eletrodo de soldagem, enquanto correntes negativas aquecem mais o metal de base. (TALKINGTON, 1998)

Para iniciar um arco é necessário aquecer as superfícies do eletrodo consumível e do metal de base até que sejam capazes de emitir e de receber elétrons, assim como levar o meio que está entre o eletrodo e a peça as condições necessárias de se ionizar (SCOTTI e MONTEIRO, 2012).

Em soldagens GMAW, podem haver três tipos de transferência de material para a poça de fusão através do arco (ESAB, 2005), demonstrados posteriormente em forma de ilustração na Figura 4.

- Curto-Circuito, no qual ocorre quando o metal fundido na ponta do arame toca a poça de fusão, estabelecendo um curto circuito;
- Globular, no qual ocorre quando as gotas de metal fundido são muito grandes e movem-se em direção à poça de fusão sob a influência da gravidade;
- Aerosol (*Spray*), variação da pulsada, na qual pequenas gotas de metal fundido são desprendidas da ponta do arame e projetadas por forças eletromagnéticas em direção à poça de fusão. Vale lembrar que o a utilização da corrente pulsada é uma variação da transferência metálica por aerosol, porém com baixos valores de corrente.

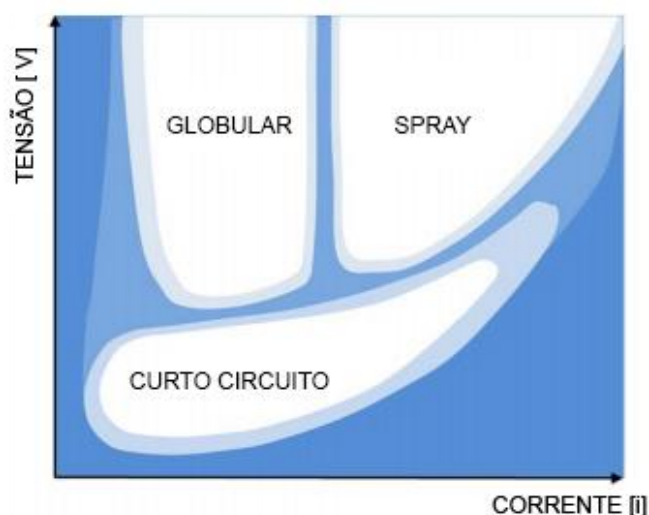
Figura 4 - Modos de transferência metálica



Fonte: (INFOSOLDA, 2013)

A Figura 5 demonstra tais modos de transferência metálica em função de valores de tensão e corrente. Além de tais fatores, outros determinantes para a transferência metálica variar são diâmetro do arame, comprimento do arco, características da fonte e gás de proteção. (ESAB, 2005).

Figura 5 – Modos de transferência metálica em função de tensão e corrente.



Fonte: Adaptado de (MODENESI, MARQUES e SANTOS, 2012)

A estabilidade da transferência metálica por MIG/MAG-P está condicionada ao destacamento de uma única gota, com diâmetro próximo ao do eletrodo durante o tempo de pulso (SCOTTI e MONTEIRO, 2012).

Desse modo, seleciona-se parâmetros para chegar em tal situação de excelência.

2.5 AÇO INOXIDÁVEL

Surgidos apenas no início do século XX, os aços inoxidáveis são uma classe de material recente. Desenvolvidos quase que simultaneamente por diversos países, são ligas ferrosas que possuem Cromo e Níquel como elementos de liga principais e diversos outros complementares. O Cromo é o principal responsável pela resistência à corrosão. Isso se faz devido o Cromo presente na liga Ferro-Cromo exposta em contato com o ar atmosférico ou outro meio oxidante, tender a formar rapidamente uma camada de óxido de Cromo na superfície destas ligas. Desta forma, essa camada se torna uma barreira invisível, contínua, aderente e impermeável contra a oxidação do ferro. (MODENESI, 2001).

O Cromo forma uma camada de óxido contínuo, aderente e muito estável na superfície, a qual protege contra a atmosfera a ser colocada. Essa cama apresenta pouca interação com a luz e permite que o aço inoxidável apresente o seu brilho característico cinza claro. Além disso, para o aço ser considerado inoxidável num sistema Ferro-Cromo e em meio a soluções aquosas com potencialidade de hidrogênio (PH) por volta de 7, uma quantidade mínima de 12% de cromo deve estar dissolvida na matriz (PADILHA, 1994). É possível ver as aplicações dos aços inoxidáveis em vários ambientes, tais como:

- Equipamentos marítimos;
- Equipamentos para indústria química;
- Equipamentos para indústria alimentícia e farmacêutica;
- Utensílios domésticos;
- Indústria automobilística, etc.

Aços inoxidáveis em geral apresentam um Forte apelo visual, devido sua aparência ser relacionada com modernidade, leveza e prestígio. De maneira geral, os aços inox, também assim denominados, apresentam alta resistência à corrosão resistência mecânica adequada, facilidade de limpeza, baixa rugosidade superficial,

facilidade de conformação e união, resistência a temperaturas criogênicas e resistência às variações bruscas de temperatura (MODENESI, 2001).

Os aços inoxidáveis são classificados em Austenítico, Ferrítico e Martensítico, Duplex e Precipitados. Os elementos de liga presentes nos aços orientam as microestruturas presentes nestes. Para nosso estudo, utilizaremos a família dos aços inoxidáveis martensíticos.

2.5.1 Aço Inoxidável Martensítico Macio CA6NM

Aços inoxidáveis martensíticos são essencialmente ligas Fe-Cr-C os quais contém entre 12-18% de cromo, 2-5% de níquel, 0,5-2,0% de molibdênio e menos de 0,06% de carbono, classificados pela ASTM (*American Society for Testing and Materials*) como A743 grau CA6NM. Estes podem ser austenitizadas se aquecidas a temperaturas adequadas. São ligas altamente temperáveis e completamente martensíticas, sendo desta forma facilmente endurecíveis por tratamento térmico. Comparado aos outros tipos de aços inoxidáveis, são mais fracos em relação a resistência à corrosão, porém satisfatório para meios menos agressivos. (MODENESI, 2001). Uma das aplicações desse aço é a construção de pás de turbinas hidráulicas e a gás, indústrias petroquímicas, corpos de válvulas, componentes de compressores e uma infinidade de elementos estruturais de aviões e motores. (BILMES, LLORENTE e IPIÑA, 2000).

A baixa soldabilidade dos aços inoxidáveis martensíticos, sua sensibilidade a trincas a frio e baixa tenacidade das uniões soldadas levaram ao desenvolvimento de aços inoxidáveis martensíticos macios com baixo teor de carbono. (FOLKHARD, 1988).

Aços do tipo CA6NM foram desenvolvidos na Suíça com características de melhor soldabilidade e propriedades mecânicas. Por apresentar uma quantidade de carbono menor que 0,06%, defeitos como trincas a quente, segregações, rechupes e inclusões são reduzidos consideravelmente. (GRACIOSO, 2003).

A *Alloy Casting Institute* (ACI) faz a classificação dos aços inoxidáveis em função a sua utilização e composição química. Para o aço CA6NM, a primeira letra refere-se a sua resistência a corrosão (C). A segunda indica o valor nominal de níquel. O número 6 indica o percentual de carbono máximo (0,06% no caso). As últimas letras

correspondem aos elementos de liga presentes, no caso níquel (N) e molibdênio (M). A Tabela 1 demonstra a porcentagem de elementos químicos contidos no aço CA6NM.

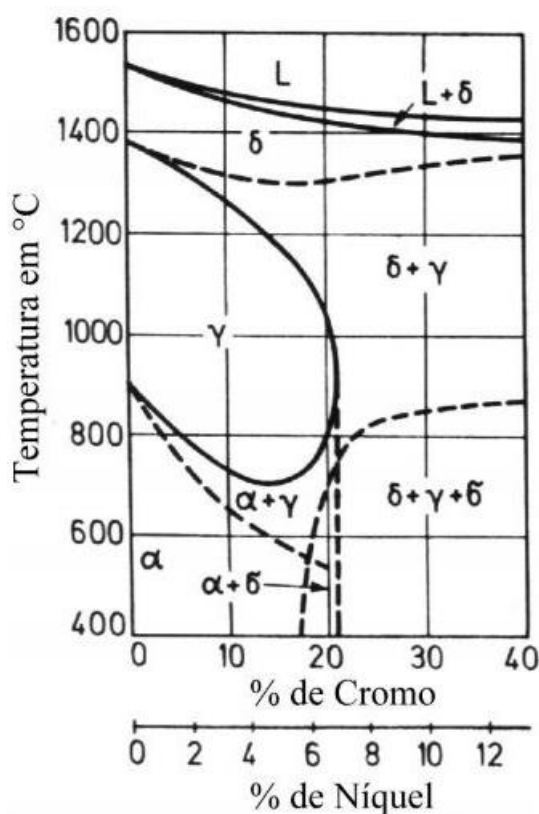
Tabela 1 - Composição química do CA6NM por norma ASTM A743

Elemento	C	Mn	Si	Cr	Ni	Mo	P	S
Percentual	<0,06	<1	<1	11,5-14	3,5-4,5	0,4-1	<0,04	<0,03

Fonte: (GRACIOSO, 2003).

Boas propriedades de soldagem desse aço estão associada a pouca quantidade de carbono para melhorar a tenacidade da estrutura martensítica, diminuindo assim a sensibilidade a trincas a frio, sendo necessária a adição de 4 a 6% de níquel determinando uma estrutura com menor quantidade possível de ferrita delta, demonstrado na Figura 6. Para melhorar a resistência à corrosão juntamente com a resistência à fragilização por revenido adiciona-se 0,5 a 2% de molibdênio (FOLKHARD, 1988).

Figura 6 - Diagrama de fases ferro-cromo-níquel, para razão cromo/níquel igual a 3:1

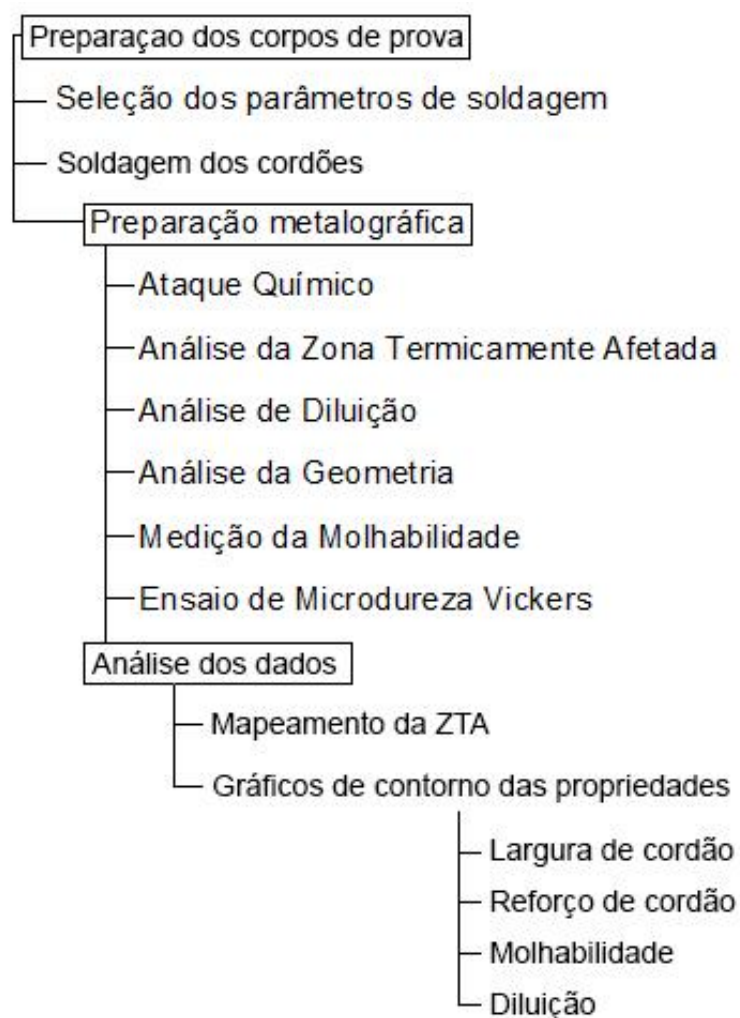


Fonte: (FOLKHARD, 1988)

3 MATERIAIS E MÉTODOS

O procedimento resume-se em depositar ER309LSi por processo de soldagem GMAW CA em chapas de CA6NM e avaliar as propriedades do processo de soldagem. Para tal, as etapas do fluxograma descrito na Figura 7 foram seguidas.

Figura 7 – Fluxograma de etapas da metodologia para alcance dos objetivos



Fonte: Autoria própria

3.1 PREPARAÇÃO DOS CORPOS DE PROVA

Utilizou-se como metal base o aço CA6NM (Figura 8) retirado de um rotor de turbina doado pelos Institutos Lactec[®]. Para garantir um padrão e uma distribuição uniforme de calor, quatro chapas foram usinadas de mesma geometria, com dimensões de 200 mm de comprimento e 150 mm de largura. Para efetuar um padrão

de espessura, as chapas foram fresadas para uma espessura de 12mm, demonstrado na Figura 9.

Figura 8 - Retalho de rotor de turbina



Fonte: Aatoria Própria

Antes dos ensaios, todas as chapas foram submetidas a um processo de abrasão leve, com esmerilhadeira Bosh GWS 900W e lixa-disco flap grão 80. Desse modo, retira-se o máximo de camada de óxido remanescente.

Figura 9 - Chapas de CA6NM prontas para deposição



Fonte: Aatoria Própria

Depositaram-se sete cordões em cada chapa, sendo quatro em uma superfície e três na outra. Para deposição, utilizou-se arame CAVSTEEL® ER309Lsi de 1,2 mm de diâmetro, cuja composição química do depósito de solda em porcentagem é fornecida pelo fabricante e apresentada na Tabela 2.

Tabela 2 - Composição química do arame-eletrodo

Material	Cr	Ni	Mn	Si	Mo	Cu	C	P	S
Percentual	23.5	12.6	2.0	0.85	0.28	0.17	0.02	0.02	0.01

Fonte: Composição fornecida pelo fabricante (CAVSTEEL®)

Entre a deposição de um cordão de solda e do outro, esperou-se cerca de 45 minutos, de forma que a temperatura do metal base voltasse a temperatura ambiente. Dessa forma, é garantido que a região termicamente afetada do próximo cordão seja fiel ao anterior. Para a verificação do alcance da temperatura ambiente, utilizou-se termopares com o auxílio do amperímetro Digital ET-3166.

Para o depósito dos cordões utilizou-se a máquina de solda Multiprocesso EMIC® TEM DIGITEC 450 Módulo Plasma configurada para trabalhar com 220V. Para a operação dessa máquina, é necessário o resfriamento da tocha de soldagem, processo este feito pelo trocador de calor Miller® Coolmate 4. O gás de proteção adotado foi Ar+25%CO₂ com 10L/min. O equipamento é demonstrado na Figura 10.

Figura 10 - Máquina de Solda MIG/MAG utilizada



Fonte: Autoria própria.

O deslocamento da tocha durante a soldagem foi realizado pelo equipamento Tartilope V1 (Figura 11), capaz de movimentar-se em velocidade constante no eixo X, possibilitando uma soldagem uniforme.

Figura 11 - Tartilope V1 posicionado com a tocha de soldagem MIG/MAG



Fonte: Autoria Própria.

A velocidade de soldagem foi constante de 20cm/min, assim como a posição da tocha de soldagem: 80° com a superfície a ser soldada e 12mm de distância do bocal para com o metal de base. O sentido de soldagem foi a puxar o cordão.

3.2 SELEÇÃO DE PARÂMETROS

Para a modelagem dos parâmetros a se estudar, escolheu-se a metodologia de desenho de experimento (DOE-*Design Of Experiment*) do tipo Composto Central Circunscrito(CCC- *Central Composite Circunscrit*) (MINITAB, 2018).

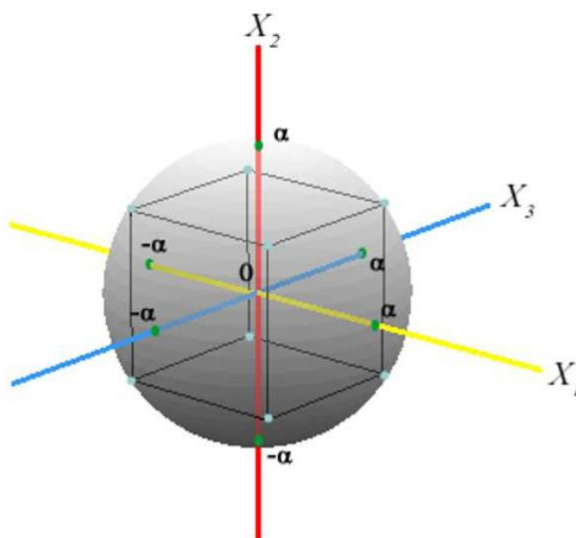
Os parâmetros centrais para o início do estudo foram obtidos de maneira experimental (Tabela 3) e foram dispostos em um cubo. Esta geometria permite a inserção de parâmetros não previstos chamados de *star-points*.

Os *stars-points* são parâmetros os quais estão dispostos em uma esfera circunscrita no cubo, sendo o raio dessa esfera simbolizado pela letra grega Alfa (α) e gerado automaticamente pelo software com $\alpha=1,68$, obtido conforme Equação 1.

$$\alpha = (2n)^{\frac{1}{4}} \quad (\text{Equação 1})$$

O desenho experimental, ou seja, a disposição gráfica dos parâmetros do experimento, onde o cubo representa os parâmetros iniciais e a esfera circunscrita com os pontos axiais, são apresentados na Figura 12.

Figura 12 - Representação do DOE-CCC



Fonte: (MINITAB®)

Para tal procedimento, adotou-se níveis de baixo, médio e alto valores de corrente com base na literatura (AMERICAN WELDING SOCIETY, 1991). Após alguns testes, os parâmetros escolhidos são apresentados na Tabela 3.

Tabela 3 - Parâmetros experimentais iniciais centrais

Nível	Corrente Positiva	Corrente Negativa	Velocidade de Alimentação do arame
Baixo	250	-50	3
Médio	300	-100	4
Alto	350	-150	5

Fonte: Autoria própria.

Seguindo como base os valores de referência e a metodologia citada, criou-se a Tabela 4, a qual demonstra o comportamento da variação dos parâmetros presentes nas 20 amostras.

Tabela 4 – Parâmetros experimentais iniciais

Nível	Corrente Positiva	Corrente Negativa	Velocidade de Alimentação do arame	Nível	Corrente Positiva	Corrente Negativa	Velocidade de Alimentação do arame
1	300	-100	4	11	350	-50	3
2	250	-150	5	12	300	-100	4
3	300	-100	4	13	300	-100	5,68
4	300	-100	4	14	250	-150	5
5	350	-50	3	15	300	-100	4
6	300	-100	2,32	16	300	-100	4
7	350	-50	5	17	350	-50	5
8	300	-100	4	18	250	-150	3
9	250	-150	3	19	300	-100	4
10	216	-16	4	20	384	-184	4

Fonte: Autoria própria.

3.3 PREPARAÇÃO METALOGRAFICA

Uma vez depositados os cordões, utilizou-se do corte dos mesmos com a finalidade de identificar e estudar a microestrutura. Na sequência repetiu-se o processo de lixamento e o polimento posteriormente. O ensaio metalográfico teve início com o corte dos corpos de prova utilizando-se uma máquina de corte (Maxi cut). Após essa etapa, utilizou-se uma lima comum para a retirada das rebarbas.

Prontas para o embutimento a quente, utilizou-se a máquina Buehler® Simplimet XPS1 com aproximadamente 15 g. de baquelite preto SkillTec®. Antes de inserir o baquelite na máquina, aplicou-se desmoldante spray Arotec® D30 e depois colocou-se a peça cortada. Feito isso com a máquina aberta, fechou-se a máquina, a qual foi programada para 7m30 de aquecimento e 2m30 de resfriamento, mantendo a pressão entre 100 a 150 Kgf/cm². Após o término dos 10 minutos, o material esteve embutido e pronto para ser lixado e polido.

O lixamento das amostras se fez possível, em uma lixadeira semiautomática Buehler Vector com água como fluido de trabalho para as lixas. As lixas variam de 220 até 1200 mesh, com uma carga programada de 15 N mantendo a rotação dos baquelites contrária a rotação da lixa. Após lixado o material, iniciou-se o polimento dos mesmos, utilizando a mesma máquina, porém modificando sua função. Para tal, desliga-se a água e utilizou-se lubrificante Schneider® LubBlue de baixa viscosidade

utilizando baixa vazão. Aplicou-se também suspensão de diamante Stuers® DiaDuo com rotações de 450 e 150 rpm, para lixamento e polimento respectivamente.

3.4 ATAQUE QUÍMICO

Após o polimento foi feito o ataque químico com reagente Vilella's, com a superfície imersa no mesmo por aproximadamente 10 segundos, com o intuito de revelar a martensita por meio de oxidação. Uma vez feito tal procedimento, lavou-se a amostra com água e álcool, fazendo a secagem com secador Britânia® Travel 100-220V.

3.5 DILUIÇÃO DOS CORDÕES

Para a análise microestrutural dos revestimentos, foram utilizadas as amostras previamente embutidas, as quais foram analisadas a sua seção transversal com o auxílio de microscópio Ótico ZeissA1.m. As lentes utilizadas foram aumento de 50x, 200x, 500x e 1000x.

Para análise da diluição dos cordões, utilizou-se as imagens obtidas em 50x. Utilizando o *software* de análise Axio Imager 2, posicionou-se cotas a fim de contornar a área acima da iminência do metal base. Analogamente, posicionaram-se cotas abaixo dessa iminência com a finalidade de medir sua área. A razão entre as duas áreas é a diluição do cordão de solda no metal de base, em porcentagem.

3.6 GEOMETRIA DOS CORDÕES

Para a análise da geometria dos cordões, utilizou-se as mesmas imagens do tópico anterior para o estudo da vista dos cordões de solda em transversal. Mediu-se as grandezas altura, largura e área.

Utilizando o *software* de análise Axio Imager 2, posicionou-se linhas de auxílio entre o metal base e o topo do reforço do cordão na vertical, sendo possível medir seu valor de altura de cordão. Analogamente, posicionou-se tais linhas na horizontal de maneira que seja possível medir seu valor de largura de cordão. Para medir a área, contornou-se o cordão de solda com linhas de auxílio e o software fornece a área.

3.7 MOLHABILIDADE DOS CORDÕES

A interação entre uma superfície e um determinado líquido denomina-se ângulo de molhabilidade. Essa medida é definido como o ângulo entre um plano tangente a uma gota do líquido e um plano contendo a superfície onde o líquido se encontra depositado, conforme demonstrado na Figura 13. A diferença entre forças repulsivas e atrativas de uma gota de um líquido mudam o valor desse ângulo (RABOCKAI, 1979). Ângulos positivos são ângulos maiores que o ângulo reto e negativos menores.

Figura 13 - Ângulo de molhabilidade. a) Ângulo positivo b) Ângulo negativo



Fonte: Autoria Própria.

Para medição do ângulo de molhabilidade, utilizou-se as imagens obtidas em 5x na etapa 3.5.1. Utilizando o software de análise Axio Imager 2, é possível traçar linhas de auxílio entre o metal base e a tangente do reforço do cordão, sendo possível medir seu ângulo.

Esse ângulo é também denominado de ângulo de contato, de tensão superficial ou hidrofobicidade.

3.8 ESTUDO DA ZONA TERMICAMENTE AFETADA

Uma vez realizado o ataque químico, com o auxílio das imagens previamente obtidas pelo microscópio ótico, é possível verificar a região termicamente afetada utilizando aumentos de 50x pela distinção de tons.

Para um mensuramento mais preciso, utiliza-se o auxílio do ensaio de Microdureza Vickers para quantificar essa região através da dureza do metal base.

3.9 ENSAIO DE MICRODUREZA

O ensaio de microdureza Vickers foi realizado em Microdurômetro *Shimadzu HVM-620 Series*, segundo norma ASTM E384-11 - *Standard Test Method for Micro indentation Hardness of Materials*, para durezas Vickers com carga de 300 gf e penetrador de diamante tipo pirâmide de base quadrada, com ângulo de 136° entre faces. **A pré carga utilizada foi de 15 Kgf.**

Posicionou-se da amostra de corte transversal embutida em baquelite no microdurômetro centralizando a amostra em sua linha de fusão com o uso da lente do equipamento para a primeira indentação (distância 0 mm da linha de referência e linha de fusão). Uma vez feito esse processo, respeitou-se as medidas da Tabela 4 para medição da linha de dureza.

Tabela 4 - Referência de medidas para microdureza

Medidas	Referência [mm]
+6	0,3
+5	0,3
+4	0,3
+3	0,15
+2	0,15
+1	+0,15
Zona fundida	0
-1	0,15
-2	0,15
-3	0,15
-4	0,5
-5	0,5
-n	Até 3 medidas padrão

Fonte: Autoria Própria

Essa foi realizada em triplicata, com espaçamento de 0,5mm entre linhas, com a finalidade de obter-se uma média de valores e desvio padrão da amostra. Como é conhecido da literatura uma dureza média de 300 HV para o CA6NM, as 3 medidas padrão buscam esse valor.

4 RESULTADOS OBTIDOS E DISCUSSÃO

Para a obtenção dos resultados, Os resultados incluem avaliação do ângulo de molhabilidade do cordão de solda, quantificação da diluição do cordão de solda no metal base, quantificação da zona termicamente afetada por Microdureza Vickers e análise da geometria.

4.1 INSPEÇÃO VISUAL

Após soldagem dos cordões de solda, realizou-se uma inspeção visual no mesmo, demonstrado na Figura 14. Devido um erro na parametrização da máquina em questão na velocidade de soldagem, houve a necessidade de fazer o parâmetro 14 posteriormente.

Figura 14 - Cordões de solda finalizados



Fonte: Autoria Própria.

De maneira geral, com arcos estáveis, pode-se afirmar que não houve respingos demasiados, mordeduras ou trincas visíveis a olho nú. Em alguns parâmetros pode-se observar a descontinuidade do cordão de solda, como 2 e 15.

O parâmetro 6 mostrou uma instabilidade grande, muitos respingos e uma soldagem oscilante, muito próximo de se extinguir.

Para melhor visualização de defeitos ligados à superfície, realizou-se o ensaio de líquidos penetrantes, visualizado na Figura 15.

Figura 15 - Ensaio de líquidos penetrantes



1,3,4

2,18,9,11,5,6

13,7,17,10,20

19,15,16,12,8

Fonte: Autoria Própria.

O parâmetro 4 apresentou duas grandes trincas possíveis de identificar a olho nu e reveladas posteriormente pelo ensaio de líquidos penetrantes. O ensaio de LP revela uma falta de fusão no parâmetro 6. Os demais parâmetros demonstraram um padrão considerável na inspeção visual.

4.2 ANÁLISE DA GEOMETRIA DOS CORDÕES

Após a realização do processo de metalografia, os resultados quanto a de diluição, reforço, largura e molhabilidade do cordão de solda foram reunidos e condensados na Tabela 5. A diluição máxima apresentou-se no parâmetro 7 com uma porcentagem de penetração no metal base de 11,2%. Os parâmetros 5 e 11 não obtiveram diluição e os parâmetros 6 e 9 uma diluição menor que 1%. A melhor molhabilidade apresentou-se no parâmetro 5 com 52° e a pior no parâmetro 14 com 109°.

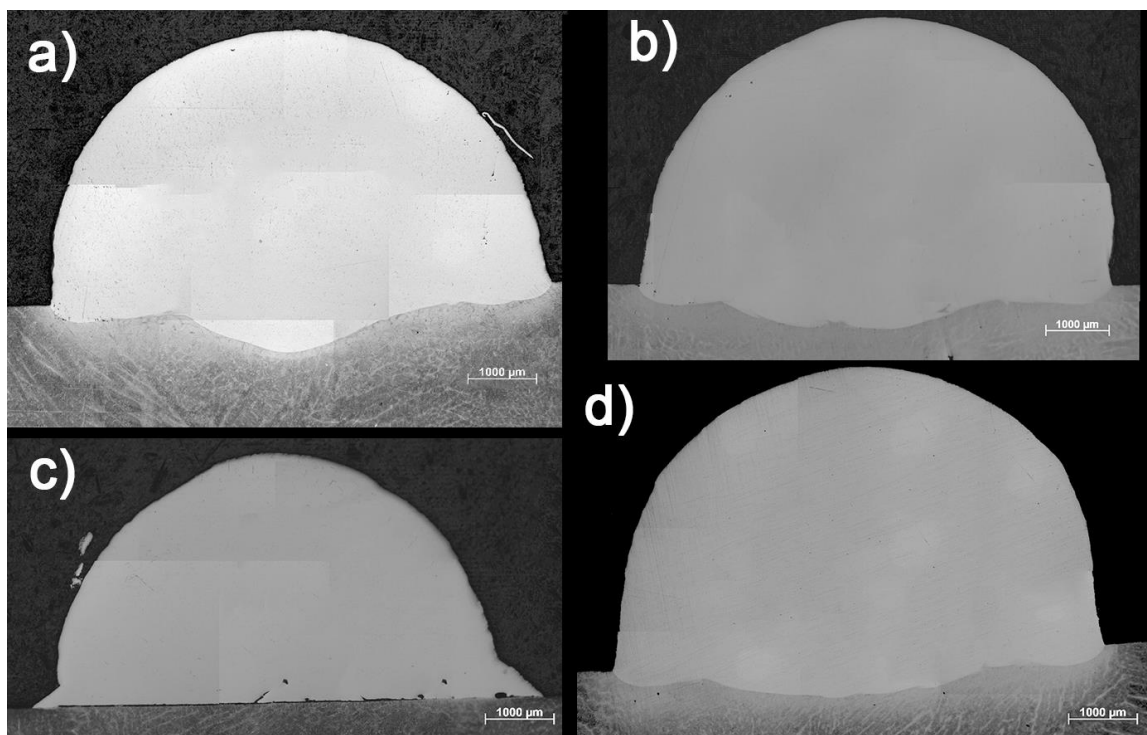
Tabela 5 - Resultado das medições

	Diluição [%]	Reforço [mm]	Largura [mm]	Molhabilidade [graus]
Amostra 1	4,9%	3,98	6,53	84,2
Amostra 2	7,8%	4,40	7,32	89,6
Amostra 3	9,8%	3,93	7,42	84,1
Amostra 4	6,3%	4,32	7,01	104,0
Amostra 5	0,0%	3,43	6,08	52,2
Amostra 6	0,6%	3,16	4,86	90,0
Amostra 7	11,2%	4,29	7,40	89,4
Amostra 8	3,7%	3,93	6,95	85,8
Amostra 9	0,9%	3,23	6,49	60,8
Amostra 10	6,6%	3,96	6,85	92,9
Amostra 11	0,0%	3,62	6,39	36,3
Amostra 12	3,0%	3,79	7,21	82,1
Amostra 13	8,0%	4,81	7,53	79,3
Amostra 14	5,7%	4,45	6,86	109,0
Amostra 15	2,4%	3,84	7,10	93,0
Amostra 16	3,9%	3,77	6,92	86,2
Amostra 17	7,9%	4,42	7,39	86,1
Amostra 18	1,4%	3,66	6,22	96,5
Amostra 19	2,8%	4,44	7,33	97,8
Amostra 20	6,4%	3,86	6,93	92,4

Fonte: Autoria Própria

Os parâmetros 3, 7, 11 e 17 estão explícitos na Figura 16 para melhor visualização da seção transversal das amostras. O parâmetro 7 demonstrou a melhor diluição e uma boa molhabilidade, o parâmetro 11 apresentou valores de diluição nulos e uma péssima molhabilidade. A amostra 3 apresenta uma diluição de 9,8% desenvolvendo uma penetração considerável e uma molhabilidade boa.

Figura 16 – Geometria dos cordões de parâmetros a) 3 b) 7 c) 11 d) 17

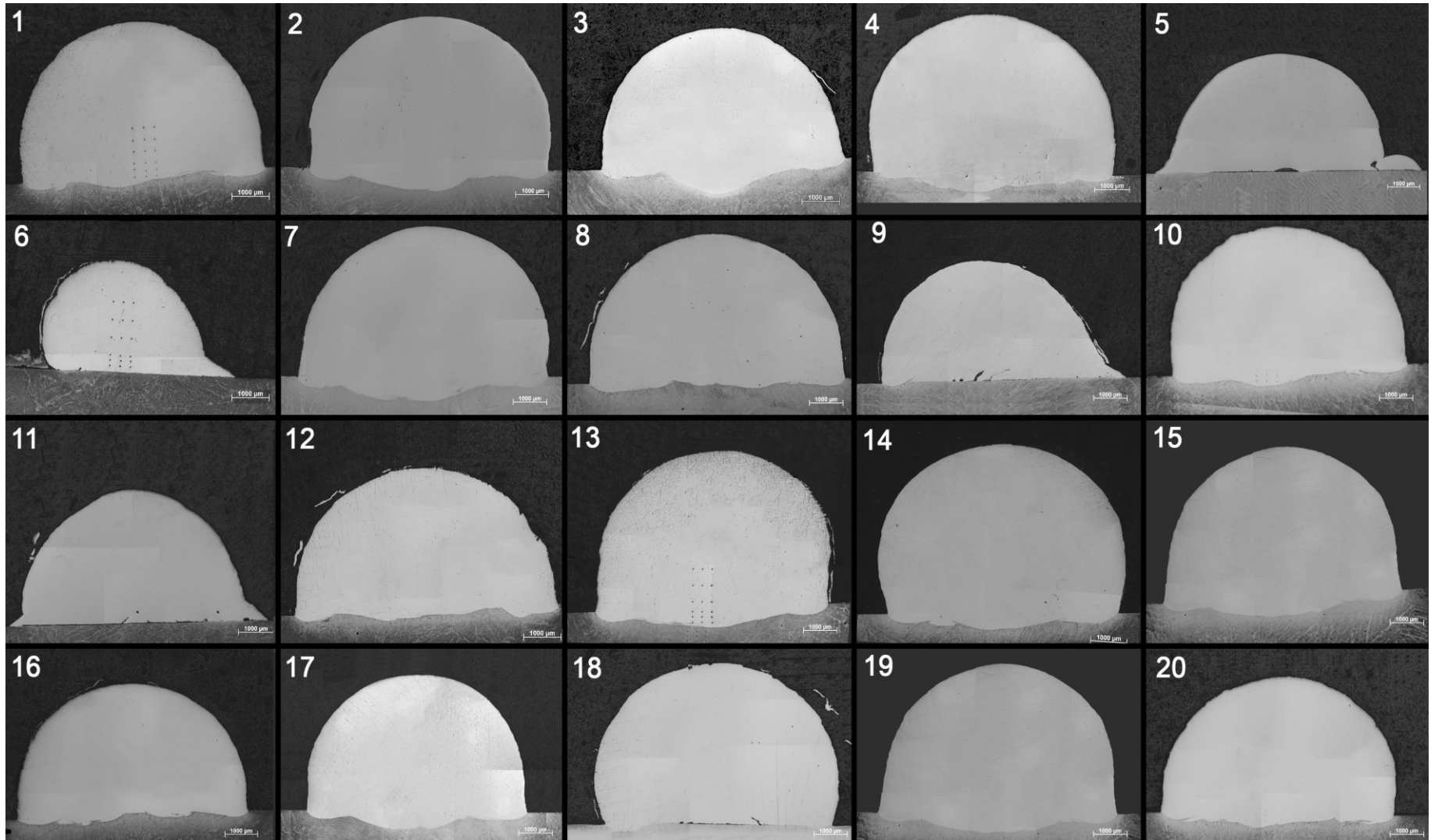


Fonte: Autoria Própria.

Todos os cortes de seção transversal dos cordões estão apresentados na Figura 17. O corte dos cordões para as seções transversais das amostras demonstradas na Figura 15 foram escolhidos aleatoriamente, escolhendo sempre a região mais central do cordão, com a finalidade de sair do regime transiente do começo e final do processo de soldagem.

A compilação de imagens da Figura 17 apresenta imagens retiradas com uma ampliação de 50x, na mesma escala de proporção de tamanho. Desse modo, é possível fazer uma rápida comparação visual entre os cordões soldados.

Figura 17 - Geometria dos cordões em 50x

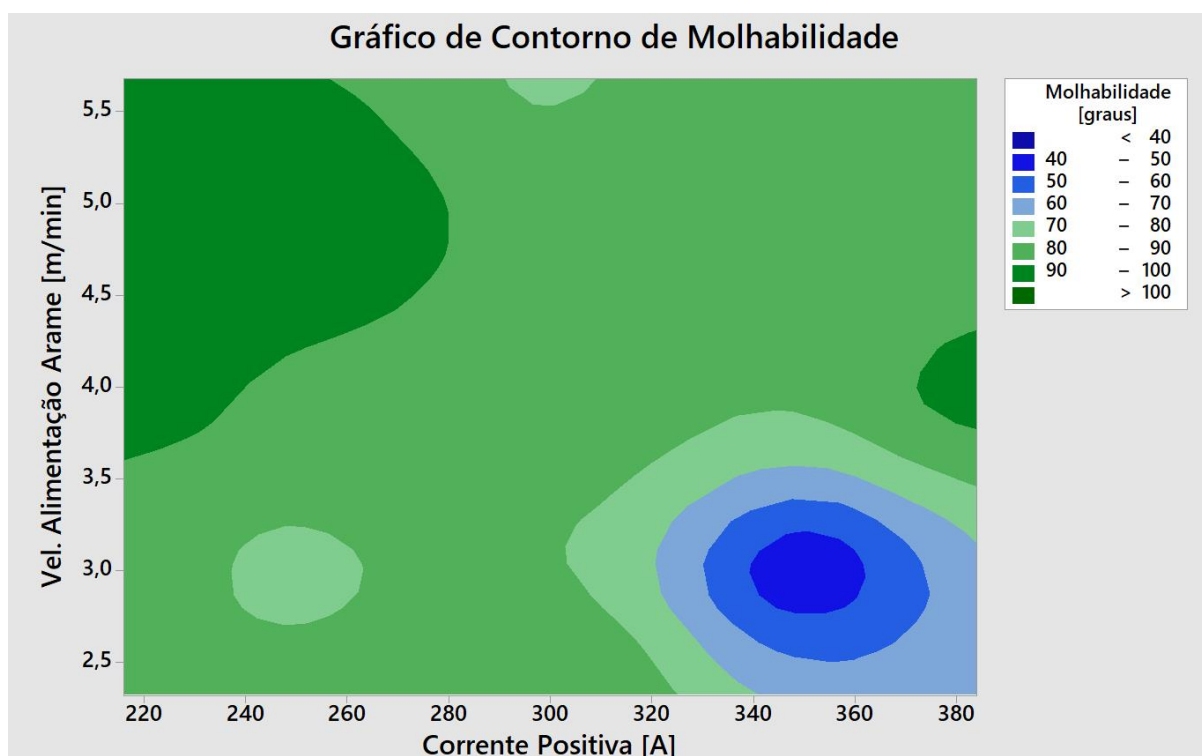


Fonte: Autoria Própria.

Para reunir as principais informações de maneira prática e rápida criou-se gráficos de contorno, com os principais fatores de estudo – molhabilidade, diluição, reforço e largura – em função de velocidade de alimentação do arame e corrente positiva.

No Gráfico 1 é possível observar que valores altos de corrente e baixos de alimentação de arame acarretam em uma molhabilidade baixa, menor que 40°. Molhabilidades maiores são encontradas em valores baixos de corrente e valores altos de velocidade de alimentação de arame.

Gráfico 1 - Molhabilidade em função de velocidade de alimentação do arame e corrente positiva



Fonte: Autoria própria

Vale salientar que em máquinas de solda MIG/MAG convencionais, os valores de tensão de saída são constantes e os valores de corrente são proporcionais à velocidade de alimentação do arame. Ou seja, o parâmetro de controle da corrente é feito através da regulação da velocidade de alimentação de arame.

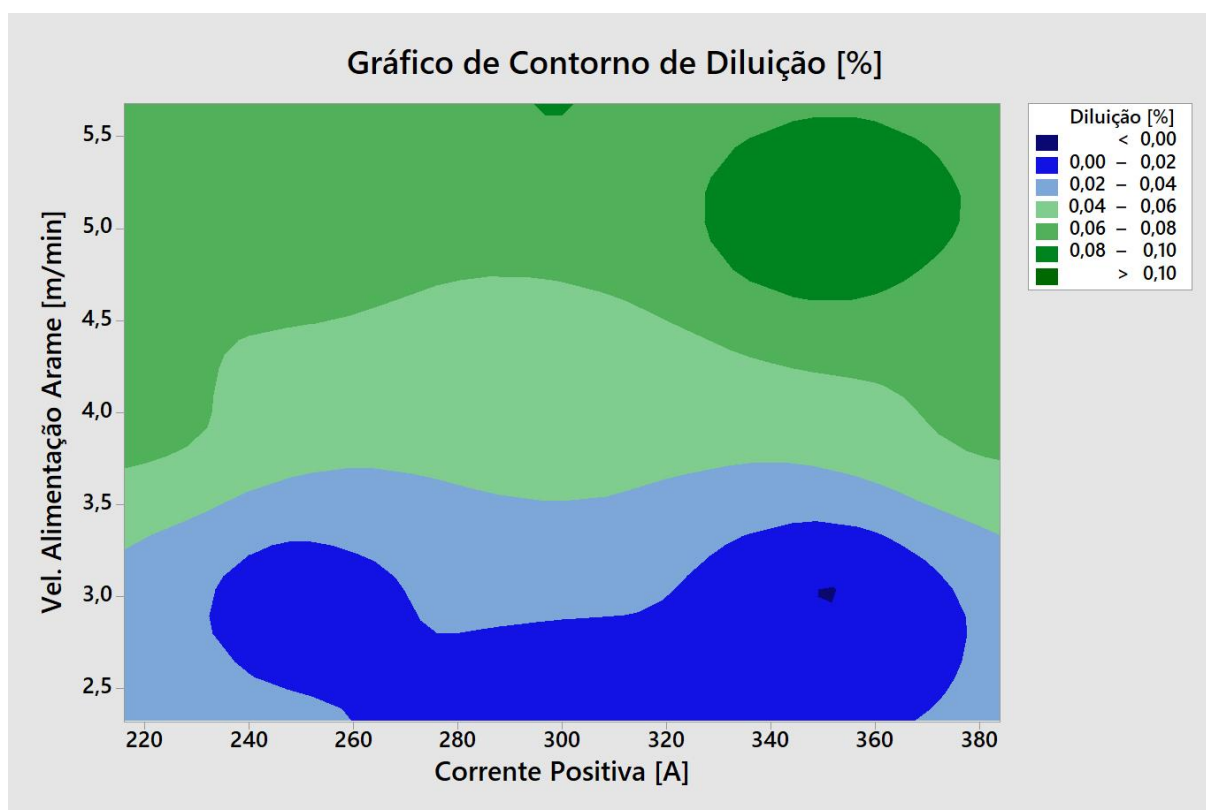
Porém, devido a tecnologia embarcada da máquina de solda utilizada neste trabalho, é possível aumentar a velocidade de alimentação de arame sem alterar valores de corrente. Isso é possível devido a um *software* do equipamento o qual modela a onda de maneira automática. Tal equipamento nos fornece a possibilidade

de uma modelagem manual das correntes de alta e de baixa para CA, mas foi optado pela modelagem automática para não transpor o âmbito dessa questão.

Em questão de diluição do cordão de solda no metal base, observa-se no Gráfico 2 que valores baixos de velocidade de alimentação de arame apresentam baixíssima diluição. A medida que os valores de velocidade de alimentação de arame aumentam a diluição aumenta. Porém apenas com altos valores de alimentação e corrente que o valor da diluição começa a ser significativo, com valores acima de 10%.

Para qualquer valor de corrente, uma alimentação acima de 4,5 cm/min fornece diluições acima de 6%.

Gráfico 2 - Diluição em função de velocidade de alimentação do arame corrente positiva



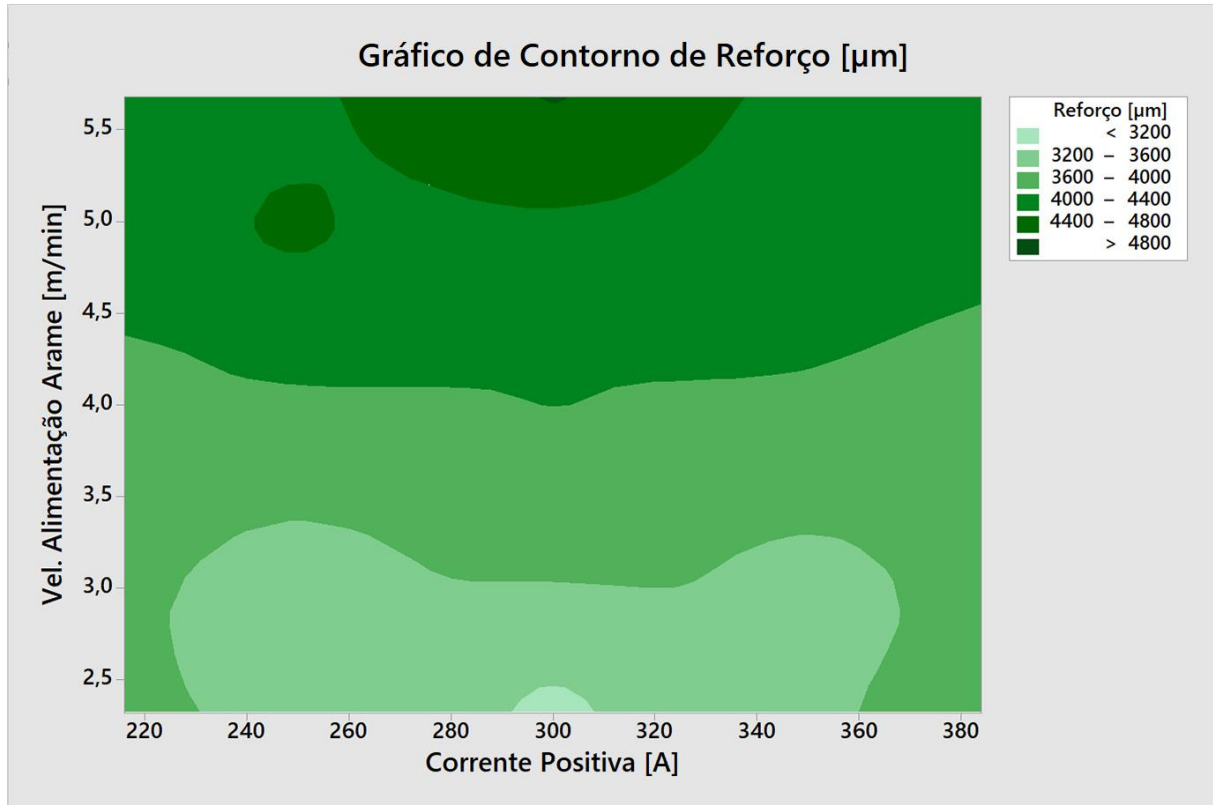
Fonte: Autoria própria

Analisando os resultados de reforço de cordão, observa-se no Gráfico 3 uma tendência de aumento do reforço a medida do aumento da velocidade de alimentação do arame aumenta.

Apesar de um ponto fora da curva de tendência, os valores de corrente se concentram em 300 A, com valores de reforço superiores a 4,8mm. Da mesma maneira os valores maiores se concentraram em 300 A com grandes velocidades de

alimentação de arame, os valores menores também se concentraram em 300 A com menores velocidades de alimentação de arame.

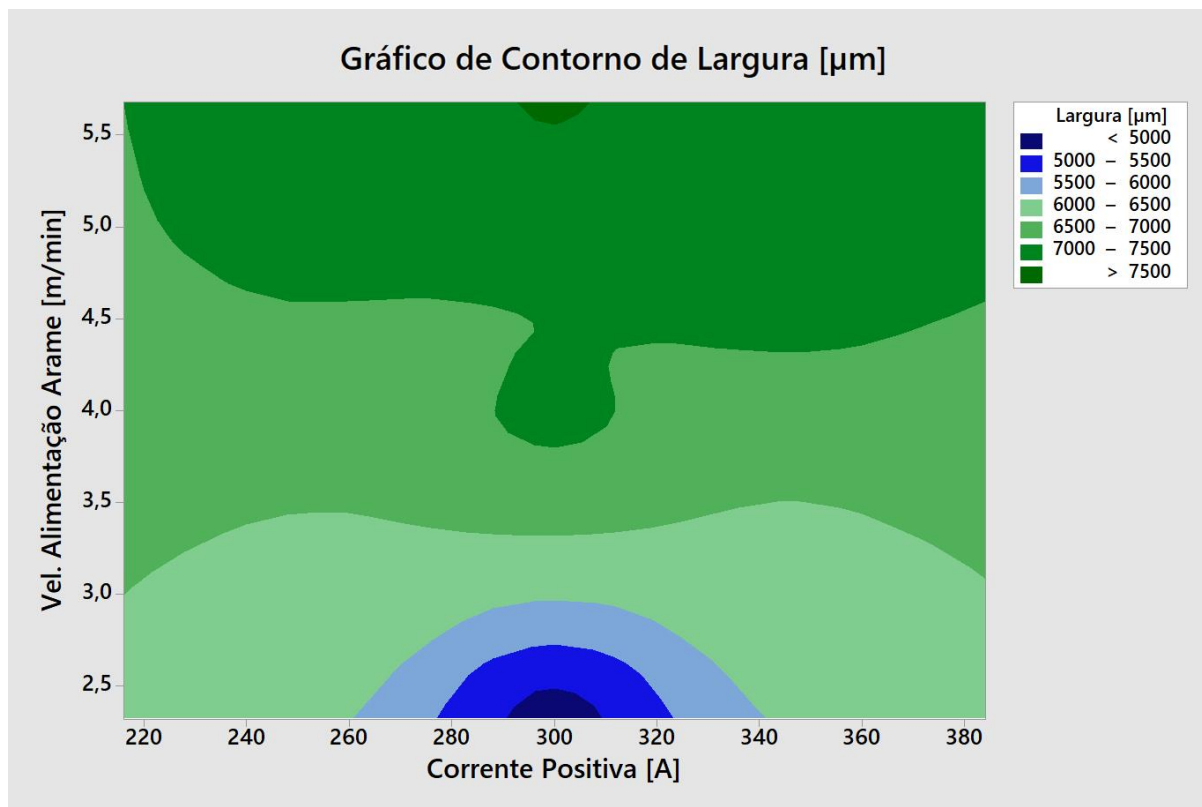
Gráfico 3 - Reforço de cordão em função de velocidade de alimentação do arame corrente positiva



Fonte: Autoria própria

Analisando o Gráfico 4, é possível perceber as larguras dos cordões de solda aumentam com o aumento da velocidade de soldagem. No ponto central da corrente, 300 A, verifica-se que mesmo com a velocidade de alimentação mais baixa apresenta um valor de largura maior que 7,0mm.

Gráfico 4 - Largura de cordão em função da velocidade de alimentação do arame corrente positiva



Fonte: Autoria própria

Para avaliação e mensuramento da zona termicamente afetada, realizou-se ensaio de Microdureza Vickers, onde os resultados serão exibidos a seguir.

4.3 MICRODUREZA DOS CORDÕES

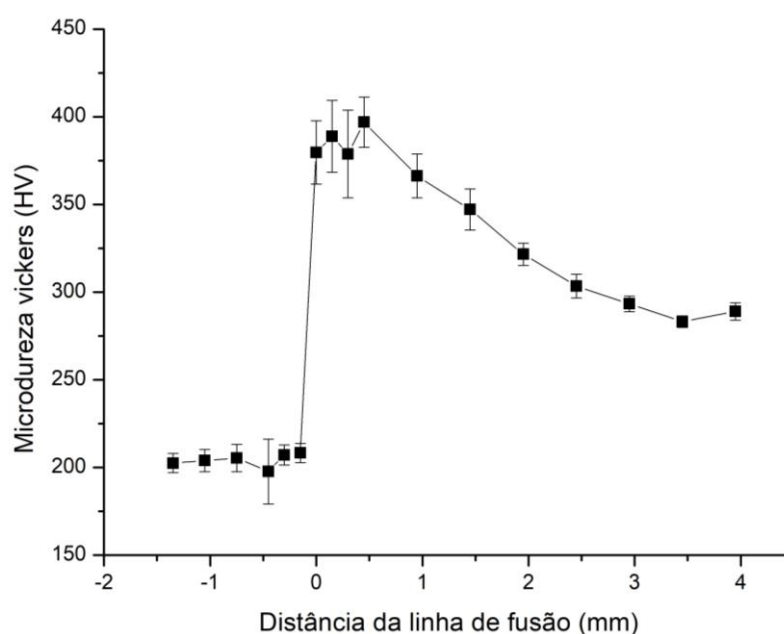
Para mapeamento da região termicamente afetada, utilizou-se da medição da dureza para mensuramento desta. A Figura 18 demonstra as medições de microdureza despostas anteriormente na Tabela 4, para a amostra 01. Como para todas as amostras o procedimento foi o mesmo, apresenta-se apenas para uma, com a finalidade de consentir as informações de maneira sucinta.

Com essas medidas, é possível obter uma média das três medições e traçar um perfil de dureza do cordão de solda até o metal de base, criando assim, um mapeamento da ZTA.

Figura 18 - Exemplo de medições de microdureza Vickers na amostra 01

Fonte: Autoria própria

Tais mapeamentos são demonstrados em gráficos de dureza por distância da Zona fundida. A zona termicamente afetada é de fácil visualização através da Microdureza Vickers devido o metal de base atingir valores médios de 300 HV. Uma vez atingindo nesses valores, sabe-se que a zona termicamente afetada cessou, podendo assim, mensurar o tamanho da ZTA. Um exemplo de mapeamento realizado é o Gráfico 5.

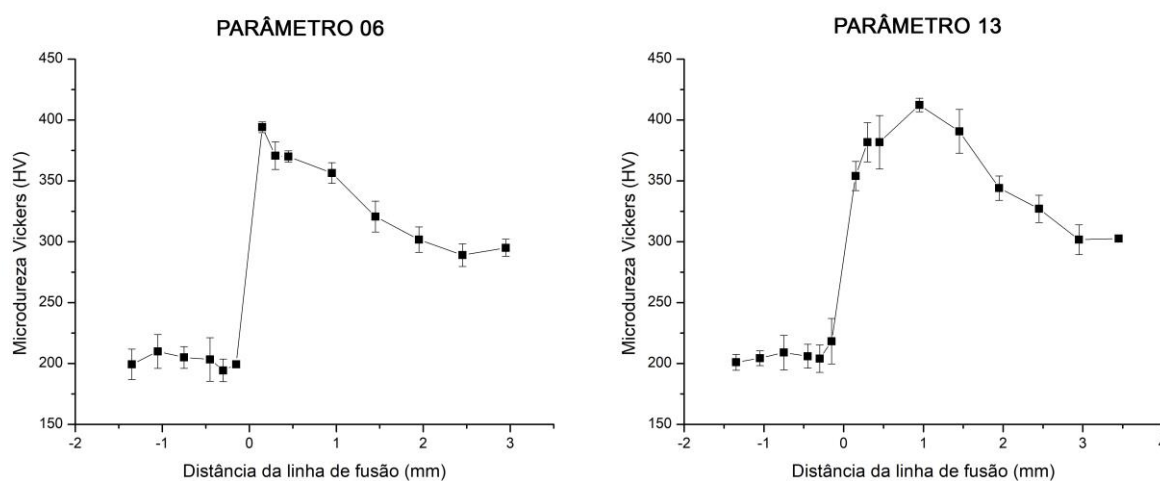
Gráfico 5 - Microdureza do parâmetro central (média)

Fonte: Autoria própria

O Gráfico 5 é uma média dos parâmetros centrais da metodologia – parâmetros 1,3,4,8,12,15,16,19 – os quais obtiveram valores muito próximos, com desvio padrão máximo de 42HV. Observa-se uma zona termicamente de aproximadamente 3 mm e uma dureza máxima de 389 HV e mínima de 283 HV. O cordão de solda obteve uma média de 203 HV.

Para os parâmetros extrapolados da metodologia – Parâmetro 6 e 13 – observa-se que, para o parâmetro de menor velocidade de alimentação de arame a ZTA apresentou uma distância de 2,5mm e para o parâmetro de maior alimentação de arame uma distância de 3,5mm, como é possível analisar no Gráfico 6.

Gráfico 6 - Perfil de Microdureza Vickers nas amostras 6 e 13



Fonte: Autoria própria

Os demais parâmetros – Parâmetros 2,5,7,9,17,20,10, 11, 14, 18 – são apresentados nos gráficos 7 e 8.

Gráfico 7 - Mapeamento de Microdureza Vickers dos parâmetros 2, 5, 7, 9, 17, 20, 10, 11, 14 e 18.

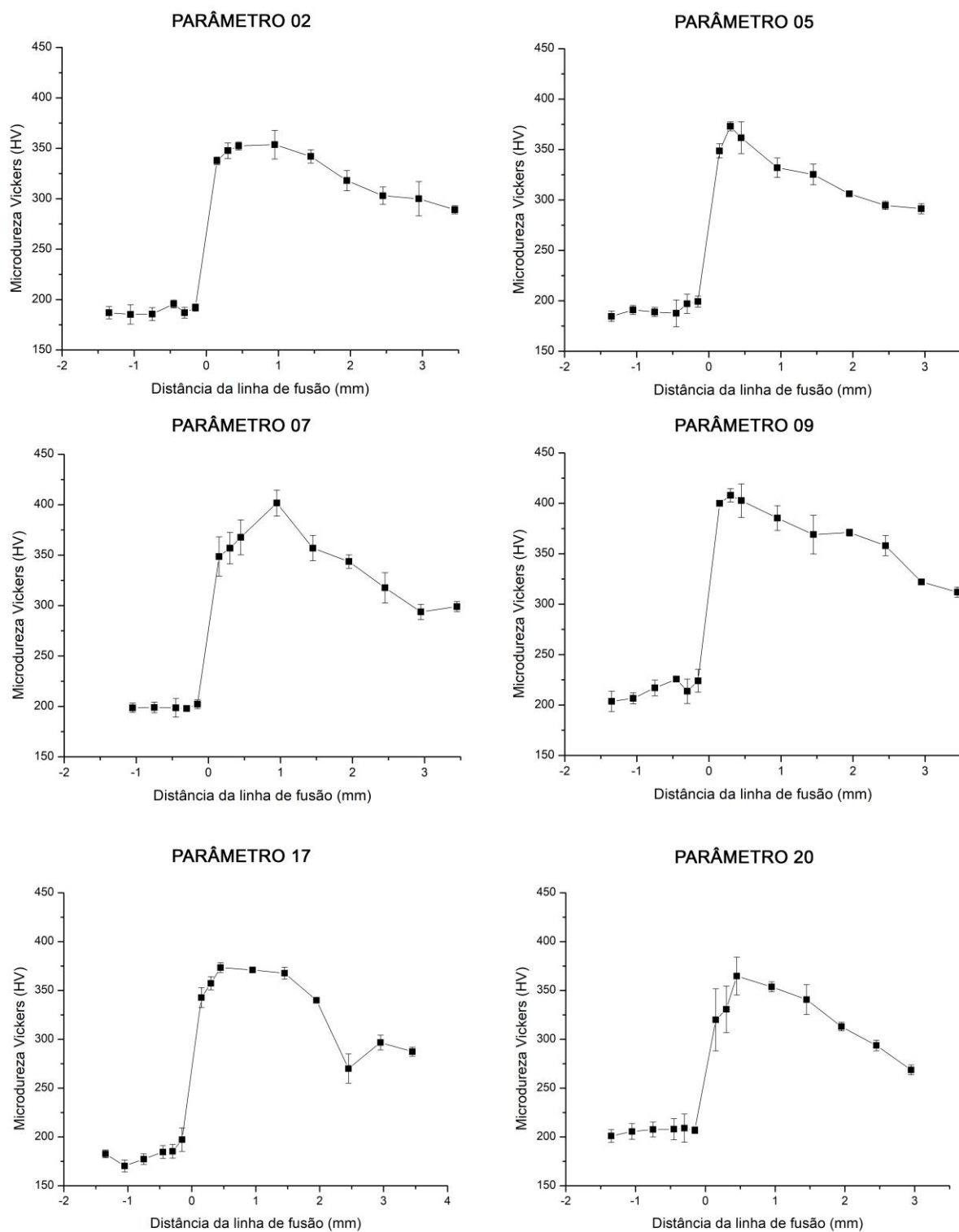
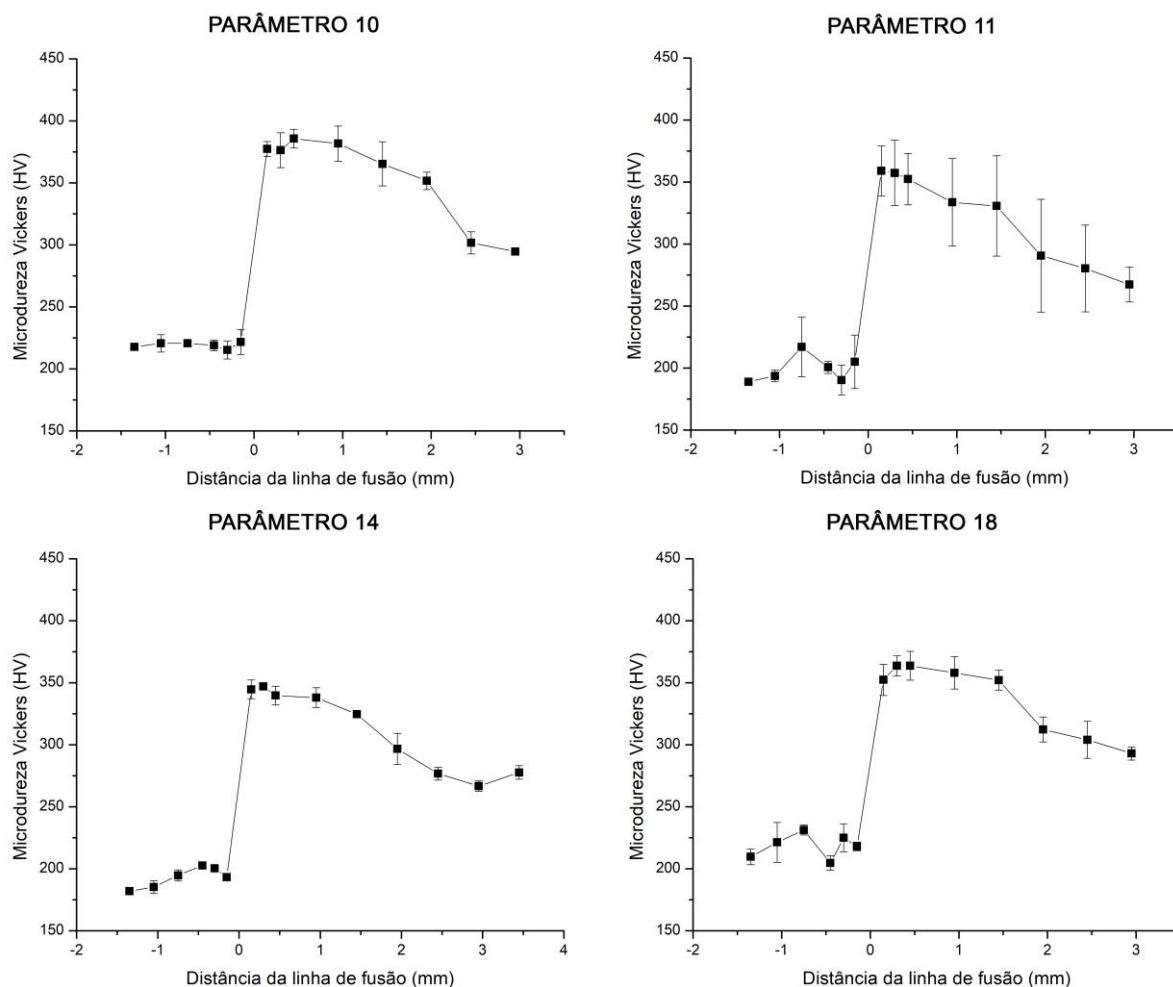


Gráfico 7 (continuação) – Mapeamento de Microdureza Vickers dos parâmetros 2, 5, 7, 9, 17, 20, 10, 11, 14 e 18.



Fonte: Autoria própria

Dessa forma, é possível apresentar na Tabela 6 a extensão da ZTA dos parâmetros faltantes, condensando assim os dados. A média de tamanho dessa área foi de 2,8mm para o parâmetro central, 2,0mm para os parâmetros extrapolados e 2,5mm para os demais parâmetros. A extensão máxima da ZTA foi de 3,0mm nos parâmetros 7 e 8 e 1,8 no parâmetro 6. As medidas máximas de microdureza encontraram-se logo após a zona fundida e também estão demonstradas na Tabela 6.

Tabela 6 - Extensão da Zona Termicamente Afetada

Parâmetro	Extensão da ZTA [mm]	Dureza máxima [HV]
2	2,5	354
5	2,2	373
7	3,0	402
9	3,0	408
10	2,2	386
11	2,0	359
14	2,5	347
17	2,8	373
18	2,2	364
20	2,8	365

Fonte: Autoria própria

Desta forma, observa-se uma variação de dureza máxima de 354 HV (parâmetro 2).a 408 HV (parâmetro 7).

Com a finalidade de explicitar melhor todos os resultados obtidos, apresenta-se a Tabela 7, na qual os parâmetros foram devidamente classificados por diluição maior que 5%, molhabilidade maior que 90° e falta de zona fundida.

Tabela 7 - Parâmetros classificados

Nível	Corrente Positiva	Corrente Negativa	Velocidade de Alimentação do arame	Nível	Corrente Positiva	Corrente Negativa	Velocidade de Alimentação do arame
1	300	-100	4	11	350	-50	3
* 2	250	-150	5	12	300	-100	4
* 3	300	-100	4	* 13	300	-100	5,68
* 4	300	-100	4	* 14	250	-150	5
5	350	-50	3	15	300	-100	4
6	300	-100	2,32	16	300	-100	4
* 7	350	-50	5	* 17	350	-50	5
8	300	-100	4	18	250	-150	3
9	250	-150	3	19	300	-100	4
* 10	216	-16	4	* 20	384	-184	4

■ Falta de fusão ou sem ZF

■ Molhabilidade > 90°

* Diluição > 5%

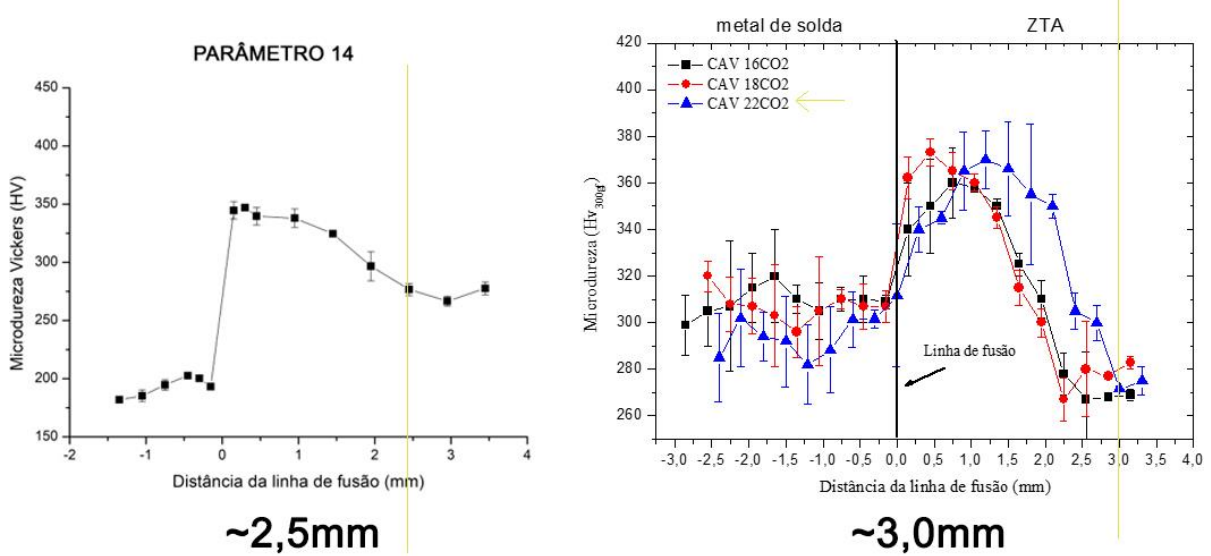
Fonte: Autoria própria

4.4 COMPARAÇÃO DE RESULTADOS

Em seu trabalho de conclusão de curso, Kruppa discute a influência dos parâmetros de soldagem na deposição de uma liga austenítica com cobalto sobre aço inoxidável martensítico macio. Guardadas as devidas proporções comparativas, é possível fazer um pequeno paralelo com seu mapeamento de zona termicamente afetada (KRUPPA, 2012).

Na Figura 19 é possível analisar uma comparação entre as espessuras das zonas termicamente afetadas entre os dois trabalhos. O parâmetro 14, o qual apresentou uma menor zona termicamente afetada, obteve aproximadamente 2,5mm de espessura, utilizando uma velocidade de alimentação do arame de 5 cm/min. Por sua vez, Kruppa utiliza valores variados de tensão e alimentação de arame. Observando os resultados dos parâmetros mais próximos, 2 cm/min de alimentação de arame, obteve-se uma zona termicamente afetada de aproximadamente 3,0mm com MIG/MAG com corrente contínua soldando CA6NM.

Figura 19 – Análise comparativa de ZTA com com gás de proteção Ar+25%CO₂.

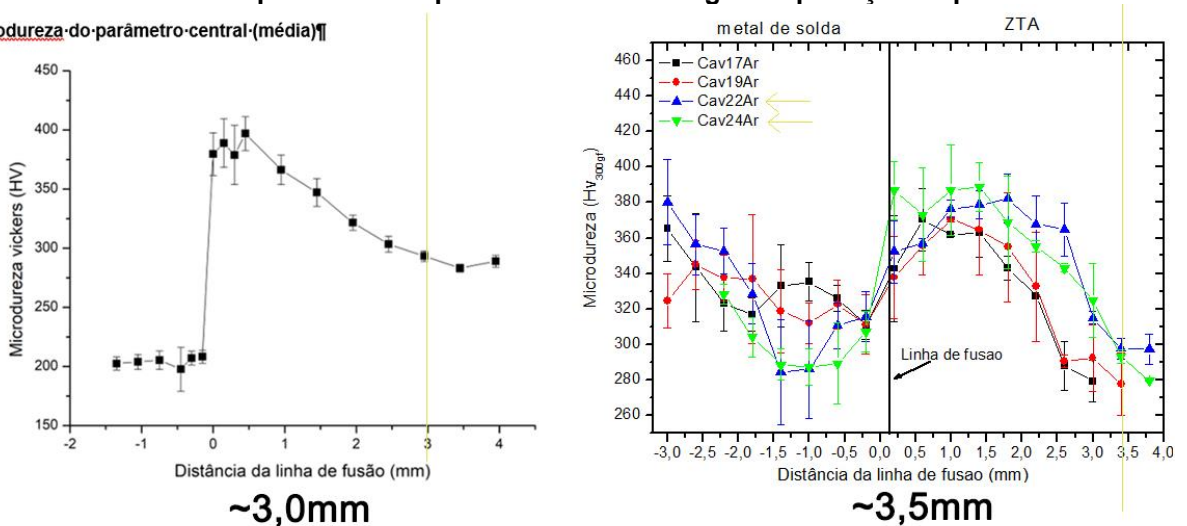


Fonte: Adaptado de (KRUPPA, 2012)

Na Figura 20 observa-se a mesma comparação, porém utilizando Argônio puro uma relação das duas zonas termicamente afetadas, uma utilizando GMAW com CA e outra utilizando GMAW com CC. Porém novamente é necessário fazer uma ressalva, pois os trabalhos apresentam diferentes velocidades de alimentação de arame, corrente, tensão e material depositado.

Figura 20 - Análise comparativa de espessura da ZTA com gás de proteção Ar puro.

Microdureza-do-parâmetro-central-(média)¶



Fonte: Adaptado de (KRUPPA, 2012)

Desta forma, tais comparações tornam-se apenas qualitativas. Para uma comparação quantitativa seria necessário trabalhar com parâmetros idênticos, variando apenas o parâmetro a ser comparado.

5 CONCLUSÕES

Após análise visual do processo de soldagem dos cordões, pode-se constatar uma tendência de estabilidade dos cordões em todos os parâmetros, exceto o parâmetro 6. Tal ocorrência está relacionada ao fato de a velocidade de alimentação de arame encontrar-se abaixo de valores limites demais. Essa falta de fusão está relacionada com o LP, o qual revela tal defeito devido manchas de maior ênfase se formarem no contorno do cordão de solda.

Além do parâmetro 6, uma ZF muito baixa ou nula pode ser observada nos parâmetros 5, 9, 11 e 18 caracterizando soldas ineficientes.

Observou-se que velocidades de alimentação de arame abaixo de 3 cm/min influenciam no comportamento da ZF, a qual por sua vez está relacionada diretamente na diluição e comprimento da ZTA. Por mais que essa máquina apresente parametrização para valores de corrente e velocidade de alimentação de arame de forma distinta, vale ressaltar que a velocidade de alimentação de arame também é um fator influenciador direto da corrente, de maneira que, maior alimentação de arame, maior a corrente em fluxo.

As velocidades de alimentação de arame muito baixas contribuíram para uma soldagem com cordões de qualidade ruim. Altas velocidades de alimentação de arame a altos níveis de corrente contribuíram para cordões com uma geometria mais limpa e favorável.

Um maior fluxo de elétrons garante forças maiores contra o metal de base, promovendo uma menor relação entre forças coesivas e trativas. Desse modo, uma maior molhabilidade é esperada em cordões de parâmetros de corrente mais elevada. As melhores molhabilidades encontraram-se nos parâmetros 4 e 14, parâmetros estes com elevados valores de corrente e alimentação de arame.

O parâmetro central de estudo apresentou condições favoráveis para o processo de soldagem acontecer de maneira estável e com resultados favoráveis.

Com base nos resultados, é possível afirmar que o parâmetro que está relacionado diretamente com a espessura da ZTA é a velocidade de alimentação de arame.

5.1 RECOMENDAÇÕES PARA TRABALHOS FUTUROS

Durante o decorrer desse trabalho, percebeu-se alguns pontos os quais poderiam ser aprofundados em trabalhos futuros. Dessa forma, lista-se algumas ideias para futuras pesquisas na área de GMAW com CA:

- Soldagem com CA fora de posição (Sobre - cabeça, Ascendente e afins);
- Variação do gás de proteção na soldagem CA;
- Soldagem GMAW com CA utilizando multipasses;
- Soldagem GMAW com CA utilizando tecimento da tocha de soldagem durante deposição dos cordões.
- Análise e quantificação de ferrita delta em aços inoxidáveis nos processos de soldagem GMAW com CA.

Além destes itens, quantificar parâmetros como molhabilidade e diluição seria de grande valia na determinação de limites de transmissão de energia em processos de soldagem CA.

6. REFERÊNCIAS

AMERICAN WELDING SOCIETY. **Welding Handbook: Welding Process**. USA: AWS, v. 2, 1991. 955 p.

AMERICAN WELDING SOCIETY. **Standard welding terms and definitions**. Miami: AWS A3.0:2001, 2001. 141 p.

BARRA, S. R. **Influência do processo MIG/MAG térmico sobre a microestrutura e a geometria da zona fundida**. Florianópolis: UFSC, 2003. 209 p.

BILMES, P.; LLORENTE, C.; IPIÑA, J. P. Toughness and microstructure of 13Cr4NiMo high strength steel welds. **Journal of Materials Engineering and Performance**, v. 9, p. 609-615, december 2000.

ESAB. **Apostila de Soldagem MIG/MAG**. São Paulo: ESAB BR, 2005. 68 p.

ESAB. Centro de conhecimento ESAB, 2019. Disponível em: <https://www.esab.com.br/br/pt/education/blog/processo_soldagem_mig_mag_gmaw.cfm>. Acesso em: 2019 Janeiro 2019.

FOLKHARD, E. **Welding Metallurgy of Stainless Steels**. New York: Springer-Verlag Wien, 1988. 279 p.

GRACIOSO, J. F. F. **Efeito das condições de têmpera na microestrutura e propriedades mecânicas de um aço inoxidável martensítico fundido CA6NM**. Florianópolis: UFSC, 2003. Dissertação.

HALLIDAY, D.; RESNICK, R.; WALKER, J. **Fundamentos de física - Eletromagnetismo**. 8. ed. Rio de Janeiro: LTC, v. 4, 2009.

INFOSOLDA. Modos de transferência metálica. **infosolda**, 2013. Disponível em: <<http://www.infosolda.com.br/biblioteca-digital/livros-senai/processos/175-processo-mig-mag-modos-de-tranferencias>>. Acesso em: 20 novembro 2018.

KRUPPA, R. D. G. **Influência Dos Parâmetros De Soldagem Na Deposição De Uma Liga Austenítica Com Cobalto Sobre Aço Inoxidável Martensítico Macio**. Ponta Grossa: UTFPR, 2012.

MINITAB, S. C. **https://www.minitab.com/pt-BR/**, 2018. Acesso em: maio 2018.

MODENESI, P. J. **Soldabilidade dos aços inoxidáveis**. Osasco: SENAI, 2001. 101 p.

MODENESI, P. J. **Soldabilidade de Algumas Ligas Metálicas**. Belo Horizonte: UFMG, 2011. 27 p.

MODENESI, P. J.; MARQUES, P. V.; SANTOS, D. B. **Introdução à Metalurgia da Soldagem**. Belo Horizonte: UFMG, 2012. 209 p.

MODENESI, P. J.; MARQUES, V. P. **Introdução aos processos de soldagem**. Belo Horizonte: UFMG, 2000. 51 p.

PADILHA, A. F. E. G. L. C. **Aços Inoxidáveis Austeníticos: Microestrutura e Propriedades**. São Paulo: Hemus, 1994.

PUKASIEWICZ, A. G. M. **Propagação de trincas por fadiga em juntas soldadas do aço inoxidável martensítico CA6NM**. Curitiba: UFPR, 2002. 104 p.

RABOCKAI, T. **Físico-Química de Superfícies**. Washington D.C: Secretaria geral da OEA, 1979.

SANTOS, T. F. D. **Soldagem MIG com corrente alternada - MIG CA**. Florianópolis: UFSC, 2008. 101 p.

SCOTTI, A.; MONTEIRO, L. S. Uma metodologia para parametrização do processo MIG/MAG CA. **Soldagem & Inspeção**, São Paulo, v. 17, n. 3, p. 271-277, Jul/Set 2012.

SCOTTI, A.; PONOMAREV, V. **Soldagem MIG/MAG Melhor entendimento, melhor rendimento**. 2. ed. São Paulo: Artliber, 2014. 288 p.

SOUZA, D.; RESENDE, A. D. A.; SCOTTI, A. Um modelo qualitativo para explicar a influência da polaridade na taxa de fusão no processo MIG/MAG. **Soldagem & Inspeção**, São Paulo, v. 14, n. 3, p. 192-198, Jul/Set 2009.

TALKINGTON, J. E. **Variable Polarity Gas Metal Arc Welding**. [S.l.]: Ohio State University, 1998. 226 p.