

UNIVERSIDADE FEDERAL DE SANTA CATARINA
CURSO DE GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA DE MATERIAIS

LEANDRO VACCARI

**AVALIAÇÃO DE EQUIPAMENTO DE SOLDAGEM TIG ORBITAL E
DESENVOLVIMENTO DE PARAMETRIZAÇÃO PARA UNIÃO DE TUBOS DE
PEQUENO DIÂMETRO EM CONFIGURAÇÃO DE DIFÍCIL ACESSO**

Florianópolis
2019

Leandro Vaccari

**AVALIAÇÃO DE EQUIPAMENTO DE SOLDAGEM TIG ORBITAL E
DESENVOLVIMENTO DE PARAMETRIZAÇÃO PARA UNIÃO DE TUBOS DE
PEQUENO DIÂMETRO EM CONFIGURAÇÃO DE DIFÍCIL ACESSO**

Trabalho de Conclusão de Curso submetido
(a) ao Programa de Graduação em
Engenharia de Materiais da Universidade
Federal de Santa Catarina para a obtenção
do Grau de Engenheiro de Materiais.

Orientador: Prof. Dr. Mateus Barancelli
Schwedersky

Florianópolis
2018

UNIVERSIDADE FEDERAL DE SANTA CATARINA
CURSO DE GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA DE MATERIAIS

LEANDRO VACCARI

**AVALIAÇÃO DE EQUIPAMENTO DE SOLDAGEM TIG ORBITAL E
DESENVOLVIMENTO DE PARAMETRIZAÇÃO PARA UNIÃO DE TUBOS DE
PEQUENO DIÂMETRO EM CONFIGURAÇÃO DE DIFÍCIL ACESSO**

Este Trabalho de Graduação foi julgado adequado para obtenção do título de Engenheiro de Materiais e aprovado em sua forma final pelo Curso de Graduação em Engenharia de Materiais da Universidade Federal de Santa Catarina.

Prof. Dylton do Vale Pereira Filho,
Coordenador do Curso e Professor da Disciplina

Comissão Examinadora:

Prof. Mateus Barancelli Schwedersky, Dr .

UFSC
Orientador

Prof. Régis Henrique Gonçalves e Silva, Dr.

UFSC

“O sucesso é ir de fracasso em fracasso sem perder o entusiasmo”

Winston Churchill

LISTA TABELAS

Tabela 1 - Parâmetros de possível configuração na fonte de soldagem	47
Tabela 2 - Parâmetros utilizados para avaliação com SAP	59
Tabela 3 - Parâmetros utilizados para soldagem dos corpos de prova aço carbono.	64
Tabela 4 - Dimensões dos cordões de solda em milímetros (aço carbono)	68
Tabela 5 - Parâmetros utilizados para soldagem dos corpos de prova aço inoxidável.	71
Tabela 6 - Dimensões dos cordões de solda (aço inoxidável 304)	72

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 – Desenhos esquemáticos mostrando o tipo de união que será estudada no presente trabalho.	15
Figura 2 - Esquema de funcionamento soldagem TIG.[1]	17
Figura 3 - Variáveis referentes ao processo de alimentação de arame na soldagem TIG.[4]	19
Figura 4 - Influência da distância eletrodo-peça nos valores de tensão e corrente de soldagem.[4]	21
Figura 5 - Variáveis no processo de soldagem por corrente pulsada. (I_p = corrente de pico; I_b = corrente de base; T_p = tempo de pico; T_b = tempo de base.)[10]	23
Figura 6 - Influência da adição de gás de hidrogênio ao gás de proteção argônio sobre os parâmetros de penetração da soldagem.[7].	25
Figura 7 - Variação genérica da temperatura ao longo do arco elétrico de soldagem	26
Figura 8 - Modos de transferência metálica: a) Ponte; b)Intermitente.[5]	27
Figura 9 - Influência da força gravitacional (g), forças eletromagnéticas (E) e tensão de superfície (M) na poça de soldagem.[14]	27
Figura 10 - Posições de soldagem convencionadas ao longo do tubo. [12]	30
Figura 11 - Diagrama de posições de soldagem ao longo da circunferência do tubo (posição 5G).[24]	31
Figura 12 - Cabeçotes de soldagem orbital TIG: 1) Cabeçote ArcMachines® 81 (utilizado neste trabalho)) 2) Cabeçote ArcMachines® para tubos de grande diâmetro 3) Cabeçote com Câmara fechada LabSolda.	32
Figura 13 - Variáveis referentes ao método de oscilação da tocha de soldagem	34
Figura 14 - Relação da Energia livre de Gibbs e a Temperatura.[29]	35
Figura 15 - Modos de crescimento epitaxial e competitivo dos grãos em direção a poça de fusão.[32]	37
Figura 16 - Influência da direção de crescimento dos grãos em relação a velocidade de soldagem: a) baixa; b)alta.[29]	38
Figura 17 - Esquema geométrico da relação entre a velocidade de soldagem (v) e a velocidade de solidificação (R) [32]	39
Figura 18 - Variação da velocidade de solidificação ao longo da poça de fusão.[10]	40
Figura 19 - Fonte de soldagem M227	42
Figura 20 - Cabeçote de soldagem M81	43
Figura 21 - Controle remoto da fonte com máscara de soldagem acoplada.	43

Figura 22 - Bancada de ensaios: (1) – Fonte de soldagem; (2) – Cabeçote de soldagem e estrutura de sustentação; (3) – Controle remoto integrado.	44
Figura 23 - Cabeçote de soldagem - (1) - Corpo de prova	45
Figura 24 - (1) - Eixo de Movimentação em "Z" / Eixo de Tecimento; (2) - Eixo de movimentação AVC	46
Figura 25 - Execução de algumas variáveis de processo em relação ao tempo	49
Figura 26 - SAP - Sistema de Aquisição Portátil	50
Figura 27 - Comprovante parâmetros de soldagem, impresso pela fonte de soldagem	51
Figura 28 - Especificação dimensional do cordão de solda (tamanho mínimo)	52
Figura 29 - Simulação da área soldada no componente	53
Figura 30 - Modelo de corpo de prova fabricado em aço carbono.	54
Figura 31 - Corpos de prova fabricados em Aço Inoxidável.	55
Figura 32 - (1) - Passe único (dimensões em mm)	56
Figura 33 - (2) - Passe único com tecimento (dimensões em mm)	56
Figura 34 - (3) - Dois passes (dimensões em mm)	56
Figura 35 - (4) - Três passes (dimensões em mm)	57
Figura 36 - Ensaio de Raio-X	58
Figura 37 - Oscilograma de corrente e tensão elétrica, primeiro teste	60
Figura 38 - Oscilograma de corrente e tensão elétrica, segundo teste.	60
Figura 39 - Tensão e Corrente Elétrica ao longo do cordão de solda	61
Figura 40 - Velocidade de arame de 1 m/min	62
Figura 41 - Velocidade de arame de 1,5 m/min	62
Figura 42 - Distâncias e ângulos utilizados na tocha de soldagem.	64
Figura 43 - Amostra 11	66
Figura 44 - Amostra 12	66
Figura 45 - Amostra 14	66
Figura 46 - Amostra 15	67
Figura 47 - Amostra 16	67
Figura 48 - Amostra 18	67
Figura 49 - Atuais eixos de AVC e tecimento e eixo necessário para a realização do tecimento na junta utilizada neste trabalho.	69
Figura 50 - Três passes	70
Figura 51 - Quatro passes	70
Figura 52 - Amostra 2i	72
Figura 53 - Amostra 3i	72
Figura 54 - Ensaio de raio-x nas amostras fabricadas em aço inoxidável (2i) e (3i)	73

LISTA DE ABREVIações

AVC – *Arc Voltage Control*

AWS – *American Welding Society*

CAD – *Computed Aided Design*

CCC – Estrutura cúbica de corpo centrado

CFC – Estrutura cúbica de face centrada

DEA – Distância entre eletrodo e arame (mm)

DEP – Distância entre eletrodo e peça de trabalho (mm)

g – Gravidade (m/s^2)

ΔG_v – Energia livre de Gibbs

H – Energia de soldagem (J)

I – Corrente elétrica (I)

I_b – Corrente de base (A)

I_p – Corrente de pulso (A)

L – Líquido

LabSolda – Laboratório de Soldagem - UFSC

M - Tensão Superficial (γ)

MIG – *Metal Inert Gas*

R – Velocidade de solidificação (m/s)

SAP – Sistema de Aquisição Portátil

TIG – *Tungsten Inert Gas*

T – Temperatura inicial (K)

T_f – Temperatura final (K)

T_b – Tempo de base (s)

T_p – Tempo de pulso (s)

V – Tensão de processo (V)

v – Velocidade de soldagem (cm/min)

V_{osc} – Velocidade de oscilação (cm/min)

V_s – Velocidade de soldagem (m/min)

AGRADECIMENTOS

Agradeço primeiramente a Universidade Federal de Santa Catarina – UFSC juntamente com o Instituto de Soldagem e Mecatrônica – LabSolda por todo conhecimento que me foi ensinado.

Aos professores Mateus Barancelli Schwedersky e Regis Gonçalves, pelo apoio, orientação e pela confiança depositada em mim.

A coordenação do curso de Engenharia de Materiais, à coordenadoria de estágios do curso de Engenharia de Materiais e ao departamento de Engenharia Mecânica – EMC – UFSC.

A toda equipe do Instituto de Soldagem e Mecatrônica - LabSolda UFSC pelo suporte dado e pelas amizades criadas.

Aos meus pais, irmã, namorada, familiares e amigos pelo total amor, incentivo e motivação diários. Dedico todas as conquistas a vós.

RESUMO

O presente trabalho teve o objetivo de realizar o estudo e o desenvolvimento de procedimentos de soldagem TIG orbitais visando fornecer as bases tecnológicas para o desenvolvimento de um sistema de soldagem mecanizado especialmente concebido para realizar a união de componentes de difícil acesso. Neste trabalho, foi realizada a avaliação de desempenho e análise de funcionalidades de um equipamento comercial compacto para soldagem orbital de tubos de pequeno diâmetro em ambiente com restrição de espaço. Realizou-se o estudo e desenvolvimento de procedimentos de soldagem usando diferentes estratégias de condução da soldagem para obtenção de juntas com características geométricas adequadas e livres de defeitos ou descontinuidades. Os testes foram realizados com corpos de prova fabricados em aço carbono e aço inoxidável. Para avaliação dos resultados foram realizados ensaios metalográficos e de raio-x. Considerando as diferentes abordagens estudadas, os resultados indicaram que a estratégia de realização de cordões filetados multi-passe possibilitou melhores resultados, atendendo aos requisitos dimensionais e de qualidade propostos.

ABSTRACT

The present work had the objective of carrying out the study and development of circumferential TIG welding procedures aiming to provide the technological bases for the development of a mechanized welding system specially designed to realize the union of hard to reach components. In this work, the performance evaluation of a compact commercial equipment for orbital welding of small diameter pipe inside a space restricted environment was performed. The study and development of welding procedures using different welding conduction strategies and parametrization to obtain joints with adequate geometric characteristics and free from defects or discontinuities were carried out. The tests were carried out with specimens made of carbon steel and stainless steel. Metallographic and x-ray tests were performed to evaluate the results. Considering the different approaches studied, the results indicated that the strategy of realizing multi-pass fillet strands allowed the best results, taking into account the proposed dimensional and quality requirements.

SUMÁRIO

RESUMO	10
ABSTRACT	11
SUMÁRIO	12
1 INTRODUÇÃO	13
2 OBJETIVOS	15
3 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA	17
3.1 PROCESSO DE SOLDAGEM TIG	17
3.1.1 Controle da distância eletrodo-peça (AVC)	20
3.1.2 Variáveis do processo	22
3.2 GASES DE PROTEÇÃO	24
3.3 MODOS DE TRANSFERÊNCIA METÁLICA	25
3.3.1 Comportamento da poça de fusão ao longo das posições de soldagem	27
3.4 PROCESSOS DE SOLDAGEM ORBITAL E CIRCUNFERENCIAL	29
3.4.1 Cabeçotes de soldagem orbital TIG	31
3.5 AÇOS INOXIDÁVEIS	32
3.6 TECIMENTO	34
3.7 SOLIDIFICAÇÃO	34
3.7.1 Solidificação na poça de fusão	36
3.7.2 Formação de grãos na poça de fusão	40
4 MATERIAIS E MÉTODOS	42
4.1 SISTEMA DE SOLDAGEM ORBITAL COMERCIAL	42
4.1.1 Parametrizações admitidas pelo sistema de soldagem comercial	47
4.1.2 Aquisição de dados de soldagem para avaliação do sistema	50
4.1.3 Registro de dados de soldagem junto à fonte	50
4.2 CORPOS DE PROVA	52
4.2.1 Corpos de Prova de Aço Carbono	53
4.2.2 Corpos de Prova de Aço Inoxidável	54
4.3 METODOLOGIAS DE SOLDAGEM	55
4.4 AVALIAÇÃO DOS CORPOS DE PROVA	57
4.4.1 Análises Macrográficas	57
4.4.2 Análise de Raio-X	57
5 RESULTADOS E DISCUSSÕES	59
5.1 CORPOS DE PROVA DE AÇO CARBONO	64
5.2 CORPOS DE PROVA DE AÇO INOXIDÁVEL 304	68
6 CONCLUSÃO	74
7 REFERÊNCIAS	76

1 INTRODUÇÃO

A definição adotada para a soldagem, pela *American Welding Society – AWS* (Associação Americana de Soldagem) é: *“Processo de união de materiais, usado para obter a união localizada de metais e não-metais, produzida por aquecimento até uma temperatura adequada, com ou sem a utilização de pressão e/ou material de adição.”*, abrangendo assim, de forma geral, toda a variedade de processos de soldagem existentes e suas funções.[1]

Avanços em tecnologias de automação de processos de soldagem tem permitido que equipamentos automatizados assumam papéis que eram executados historicamente por humanos, desempenhando trabalhos de alta complexidade, beneficiando o processo e a qualidade dos componentes soldados, pois, os robôs são capazes de realizarem soldas de ótima qualidade o tempo todo, sem erro humano. Os benefícios se estendem ainda mais, pois, no geral, o processo de soldagem é naturalmente insalubre, perigoso e desgastante devido a ergonomia em que o soldador é submetido, à locais de trabalho onde há outros riscos envolvidos como exposição solar e presença de agentes nocivos à saúde, e a exposição ao arco elétrico emissor de radiações eletromagnéticas que podem ser prejudiciais aos olhos e a pele. Fazendo o uso da automação de soldagem consegue-se retirar pessoas dessas más condições e coloca-as como operadores desses robôs. [1][2]

Com o avanço da ciência e da automação da soldagem, novos métodos de controle de soldagem vem sendo desenvolvidos. Certos sistemas já nos permitem realizar programações precisas dos parâmetros de soldagem e controles em casos de erros intrínsecos ao processo. O AVC (*Arc Voltage Control*) e o sensoriamento a arco são exemplos de sistema onde é possível tal controle, onde a distância do eletrodo de soldagem TIG permanece constante ao longo da soldagem (AVC) e até mesmo sistemas de sensoriamento a laser que controlam a posição do robô de soldagem, em tempo real, em relação à junta que está sendo soldada.

Em outro aspecto, o Brasil possui uma das maiores faixas litorâneas do mundo, com aproximadamente 7,3 mil quilômetros. Além de abrigar a maior parte da população brasileira, o litoral também propicia o desenvolvimento de atividades econômicas, como a pesca e o transporte marítimo, intensa atividade turística, doméstica e internacional, os portos marítimos são responsáveis pelo escoamento de mais de 80% das exportações do país sendo elementos que marcam a paisagem e refletem o dinamismo econômico de muitas cidades litorâneas brasileiras. Nas cidades portuárias, a atividade dos portos dinamiza o comércio local, gera empregos e eleva o orçamento das administrações municipais. Visto a indubitável importância do litoral para o país, a necessidade de preservação e proteção da faixa litorânea é essencial para o contínuo processo de desenvolvimento do país, assim como a segurança de todos esses recursos em eventuais tempos de crise. Dessa forma, é evidente que a capacidade de realizar a construção de embarcações, tanto de transporte, como de defesa, é de importância estratégica para o país. Para esse tipo de construção, os processos de soldagem tem grande importância, de forma que o estudo, desenvolvimento e aprimoramento desses métodos é fundamental para que a indústria nacional possa avançar. [3]

O trabalho atual está inserido no contexto de um projeto de colaboração técnica entre o LabSolda UFSC e a Marinha do Brasil tendo como objetivo o estudo e o desenvolvimento de um dispositivo de soldagem automático para a soldagem de tubos de pequeno diâmetro em regiões de difícil acesso, visando a facilitação da soldagem de tais componentes assim como aumentando a confiabilidade dos componentes. Existe uma grande variedade de equipamentos de soldagem automática TIG orbital disponíveis comercialmente, porém, devido às características de difícil acesso do tubos em questão, não foram encontrados equipamentos comerciais que atendessem às características geométricas, justificando assim estudos para avaliar a possibilidade de desenvolvimento de um dispositivo específico para a aplicação.

A Figura 1 mostra desenhos que ilustram o tipo de soldagem que foi objeto de estudo no presente trabalho. Trata-se da soldagem de união de dois tubos, denominados tubo superior e tubo inferior (no desenho somente estão representadas as extremidades de cada tubo). O projeto do componente possui especificação de que o cordão de solda

tenha no mínimo 9 mm de “perna”, conforme mostrado na Figura 1. Para depositar o metal necessário para formar o cordão com a geometria desejada existem diferentes abordagens, que podem variar desde a realização de um passe único, até a realização de múltiplos passes, com diferentes velocidades, correntes de soldagem e tipos de movimentação da tocha de soldagem. A combinação desses diferentes parâmetros deve ser estudada visando obter um procedimento que produza os resultados desejados.

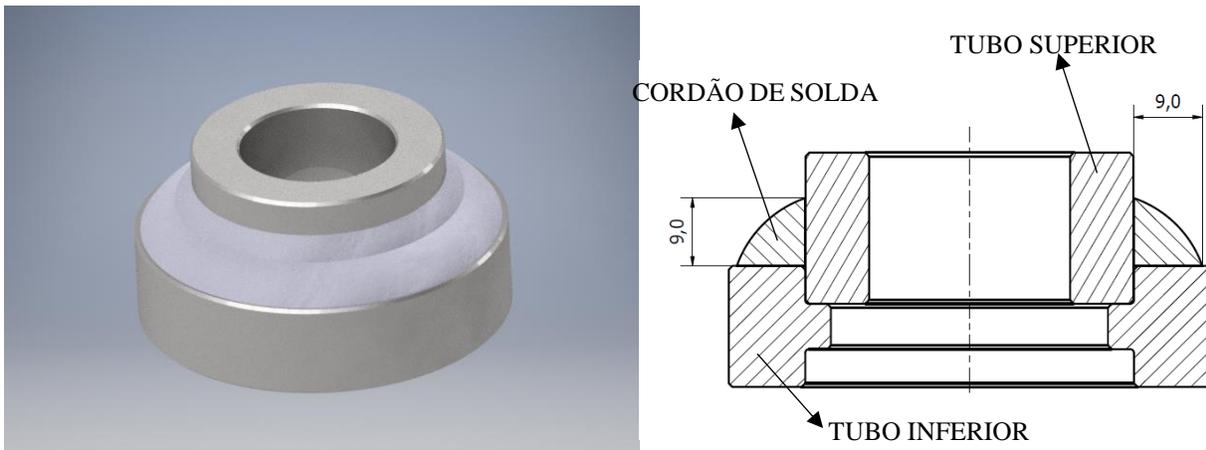


Figura 1 – Desenhos esquemáticos mostrando o tipo de união que será estudada no presente trabalho.

2 OBJETIVOS

O objetivo geral do presente trabalho é realizar o estudo e o desenvolvimento de procedimentos de soldagem TIG circunferenciais visando fornecer as bases tecnológicas para o futuro desenvolvimento de um sistema de soldagem mecanizado especialmente concebido para realizar a união de componentes de difícil acesso.

Para viabilizar o trabalho, foi utilizado um cabeçote de soldagem TIG orbital disponível no LabSolda, o qual permite realizar as soldas simulando as condições necessárias para o estudo.

Como etapas para obtenção do objetivo geral, foram listados os seguintes objetivos específicos:

- Projetar e fabricar um suporte e dispositivos auxiliares que permitam a utilização do cabeçote de soldagem TIG Orbital disponível no LabSolda para operar em condições idênticas ao tipo de junta e posição de soldagem requeridos.
- Realizar o projeto e a fabricação de corpos de prova que permitam realizar testes de soldagem em condições idênticas ao requerido.
- Realizar testes de soldagem buscando obter uma parametrização que atenda aos requisitos do projeto da junta soldada, avaliando, a estratégia de soldagem em passe único ou multi-passe; necessidade de utilização de movimento oscilatório durante a soldagem; necessidade de utilização de AVC.
- Avaliar os resultados obtidos nas diferentes condições utilizando: aquisição de dados elétricos do processo; inspeção visual; inspeção metalográfica, inspeção por raio-x.
- Caracterizar e avaliar o desempenho do cabeçote de soldagem TIG Orbital disponível no LabSolda, com relação aos seguintes aspectos: capacidade de realizar o procedimento desejado; e ocorrência de falhas durante a operação; possibilidade de registro, arquivamento, transferência e exibição dos parâmetros para rastreabilidade de cada solda realizada.

3 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

3.1 PROCESSO DE SOLDAGEM TIG

De acordo com a bibliografia, o processo de soldagem TIG pode ser definido como:

A soldagem a arco com eletrodo de tungstênio e proteção gasosa TIG (também conhecido como Gas Tungsten Arc Welding – GTAW) é um processo no qual a união de peças metálicas é produzida pelo aquecimento e fusão destas através de um arco elétrico estabelecido entre um eletrodo de tungstênio, não consumível, e as peças a serem unidas. A proteção da poça de fusão e do arco contra a contaminação pela atmosfera é feita por uma nuvem de gás inerte ou mistura de gases inertes.[1].

A Figura 2 ilustra o funcionamento do processo.

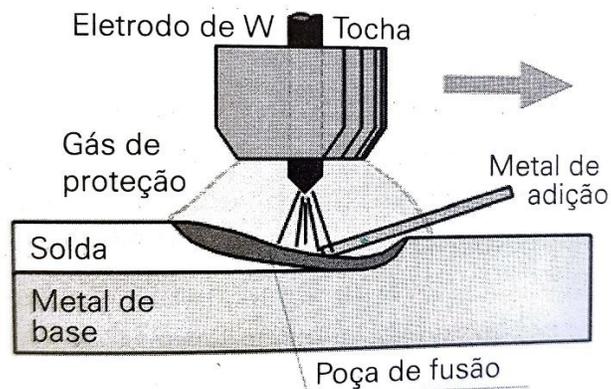


Figura 2 - Esquema de funcionamento soldagem TIG.[1]

O arco elétrico na soldagem TIG é bastante estável, suave e produz, em geral, soldas com boa qualidade e aparência, exigindo pouco ou nenhum tratamento ou limpeza após o processo de soldagem. [1]

Outra característica importante do processo de soldagem TIG é a possibilidade de controle de energia transferida para a peça. Isto ocorre pelo fato das variáveis

corrente, velocidade de soldagem e arame de adição, serem controlados de forma independente, possibilitando, desta forma, a união de peças de pequena espessura e difícil soldabilidade, obtendo ótimos resultados.

O gás de proteção estando ionizado, propicia a condução de corrente elétrica. O gás geralmente utilizado é Argônio puro, porém Hélio ou uma mistura entre os mesmos também podem ser utilizados. Em alguns casos a adição de Hidrogênio e Nitrogênio é utilizada visando maior penetração do cordão de solda e melhor aspecto.

O processo de soldagem TIG, devido a seu eletrodo não consumível na tocha de soldagem, pode ser utilizado sem a adição de material de adição. Neste caso, o processo é denominado como autógeno. De forma geral, o processo autógeno possui menor custo de operação visto que é possível a automatização do processo de forma mais simplificada além de ter-se menores custos de operação, pois, não é necessário a alimentação de material de adição, entretanto, na maioria das vezes é desejada a adição de material.[1]

A alimentação durante a soldagem TIG pode ocorrer de forma manual, feita por um operador durante o processo ou de forma automatizada através de uma vareta, ou utilizando um sistema acoplado a tocha de alimentação de arame. [4]

A maneira sobre a qual o arame é adicionado durante o processo de soldagem tem impacto direto na qualidade final da solda e na prevenção dos defeitos mencionados. Deste modo, outros fatores de parametrização devem ser ponderados referentes à alimentação, por exemplo o ângulo de entrada do arame em relação a tocha (α) e a distância eletrodo/arame (DEA) mostrado na Figura 3. Além disso, a posição referente ao local de inserção do arame em relação a direção de soldagem, deve ser considerada, sendo ela pela frente ou por trás da tocha.

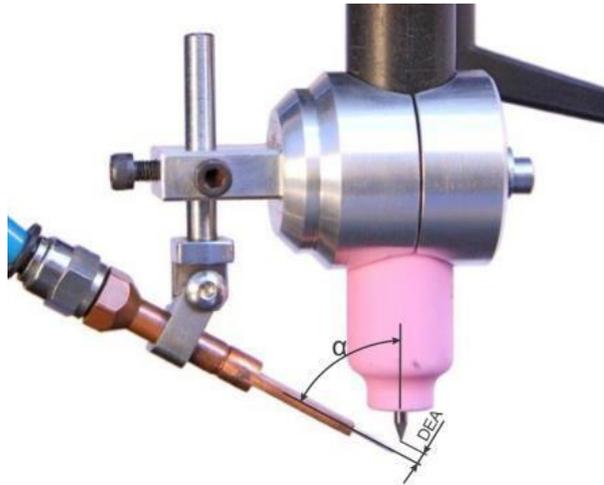


Figura 3 - Variáveis referentes ao processo de alimentação de arame na soldagem TIG. [4]

No processo de soldagem TIG alimentado e também no MIG/MAG, o cabeçote alimentador é composto por um motor-tracionador, conduítes para o arame e um sistema eletrônico para controle dos parâmetros de alimentação sincronizado com a fonte de soldagem com controle para ambos. Em sistemas de soldagem mecanizados, como os cabeçotes orbitais, geralmente o alimentador fica integrado ao equipamento. O metal de adição é fornecido na forma de bobinas ou arames, sendo estas bobinas igualmente utilizadas nos processos MIG/MAG [5].

Existem dois modos de operação dos arames de alimentação, os chamados *Cold* e *Hot Wire*, arame frio e quente, respectivamente. O arame de adição quando é inserido na poça de solda, em temperatura ambiente, durante o procedimento de soldagem é denominado na literatura como *Cold Wire*. Porém outra técnica bem difundida no ramo da soldagem é a técnica *Hot Wire*, existem inúmeros métodos pelos quais o arame pode ser aquecido, o mais simples deles é circular uma corrente constante pelo material de adição, que será aquecido ao fechar o circuito elétrico em contato com a poça fundida (Efeito Joule), esse método tem as vantagens de aumento de penetração do cordão de solda e aumento da produtividade pois o arame necessita de menos energia para ser fundido, pois já está quente. [6]. Neste trabalho será empregada somente a técnica do arame frio, já que a soldagem em questão é de grande complexidade, e a

utilização do sistema *Hot Wire* traria um nível de complexidade ainda maior, que não é desejado.[7]

3.1.1 Controle da distância eletrodo-peça (AVC)

O controle da distância do eletrodo (DEP) até a peça é de fundamental importância para manter o processo TIG estável. Uma distância constante significa um comprimento de arco elétrico constante e conseqüentemente uniformidade do calor aplicado e do processo de soldagem como um todo.

Imperfeições geométricas da peça que está sendo soldada ou até mesmo no equipamento de soldagem como a centralização e movimentação dos eixos em relação ao componente que está sofrendo soldagem, podem alterar a DEP, podendo, em alguns casos, provocar o toque do eletrodo na peça. Como conseqüência disto, ocorre a extinção do arco elétrico.

Outro problema que pode ser ocasionado pelo toque do eletrodo na peça, é inclusão de tungstênio, proveniente do eletrodo. Caso haja esse tipo de inclusão, é necessário a posterior limpeza do componente para a remoção da contaminação de tungstênio, sendo um problema de grande importância neste trabalho e um ponto de atenção, pois, não é possível a limpeza da área contaminada devido à dificuldade de acesso ao componente.

Em outros casos, se a DEP for grande demais, poderá ocorrer o desligamento do arco elétrico, falta de fusão do metal de adição e metal de base do material ou o arco pode ser desviado para regiões não desejadas. Aumentando o comprimento do arco elétrico, devido ao formato cônico do arco tem-se uma maior área na base deste e conseqüentemente menor concentração da energia aplicada no processo.

No processo de soldagem TIG, a tensão elétrica (V), tem relação a uma determinada distância entre o eletrodo de soldagem e a peça. Essa tensão varia de acordo com a corrente de soldagem aplicada. Em sistemas automatizados é possível a configuração de uma tensão de referência, que representa uma distância entre a ponta do eletrodo e a peça, assim o sistema automatizado realiza as devidas correções à fim

de manter a tensão de referência constante. Essa correção ocorre através da movimentação da tocha de soldagem, o benefício desse método é que, caso haja imperfeições no componente metálico que esta sendo soldado ou no alinhamento entre as partes, o sistema sempre atuará de forma a manter o comprimento do arco constante, garantindo a qualidade final do cordão.

Cabe ressaltar que a tensão do processo TIG tem uma ligação diretamente proporcional com a altura do arco. Em processos automatizados, o controle desta tensão é feito a partir de sistemas integrados aos manipuladores de tochas de soldagem que promovem o controle da distância entre o eletrodo e a peça corrigindo a variação do comprimento do arco a partir de uma tensão elétrica de referência pré-estabelecida. Estes sistemas são denominados AVC, do inglês, *Arc Voltage Control*.

A variável de controle na soldagem TIG é a corrente de soldagem. A Figura 4, evidencia a variação da tensão e distância do eletrodo em relação a peça com a variação da corrente elétrica aplicada no processo e a característica estática do arco elétrico no processo. Cada uma das curvas representa uma distância entre o eletrodo e a peça (canto superior direito).

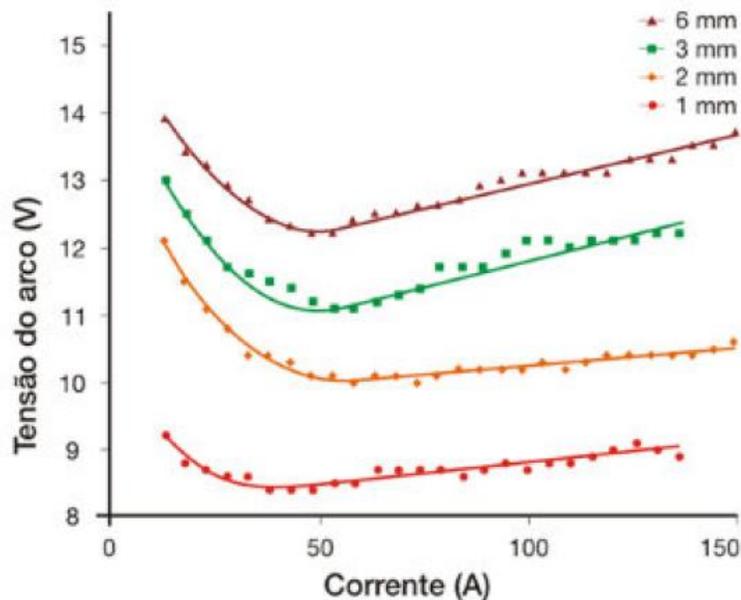


Figura 4 - Influência da distância eletrodo-peça nos valores de tensão e corrente de soldagem.[4]

Nota-se que há uma descida das curvas chegando a um valor mínimo e posteriormente volta a subir de maneira suave, isso ocorre pelo fato de em baixas correntes de soldagem a tensão do arco não ser linear ao aumento da corrente. Segundo teorias, esse comportamento é próprio do arco elétrico em baixas correntes se dá pelo fato de que a condução da corrente elétrica no arco é feita por íons e elétrons gerados pela emissão termiônica, o efeito termiônico ocorre em diversos metais e está diretamente ligado com a temperatura que o metal está submetido, sendo mais eficiente em temperaturas próximas a temperatura de fusão.[8]

Na Figura 4, em baixas correntes, a emissão termiônica é prejudicada, resultando em uma maior dificuldade para a passagem da corrente e, como consequência, em um aumento da tensão elétrica do arco. Esse fenômeno ocorre até determinado valor, em torno de 50 A, não sendo um problema na prática pois utiliza-se para soldagem usualmente correntes acima de 50 A.

Com base nas curvas da Figura 4 é possível estimar a tensão para uma determinada corrente, visando uma distância fixa entre o eletrodo e a peça.

3.1.2 Variáveis do processo

No atual trabalho, foi utilizada a soldagem com corrente contínua pulsada. Nesse modo há maior possibilidade de controle do aquecimento da peça soldada. O controle é feito através da variação da corrente de soldagem, de forma cíclica, entre um valor mínimo, chamado corrente de base, e um valor máximo, chamado corrente de pulso. Além disso é possível controlar os tempos de base e pulso, como mostrado na Figura 5, a fim de se obter as características desejadas.

A oscilação entre a corrente de base e pulso gera, fisicamente, no cordão de solda, uma série de pontos sobrepostos que formam um cordão contínuo. Na fase de pulsos, onde a corrente está com seu valor de mais elevado, ocorre o aquecimento e fusão, já com a nos seus valores de corrente de base ocorre o resfriamento e solidificação do metal de base.

O processo pulsado, também possui a vantagem de ser empregado com ou sem adição de arame. Em aplicações onde se necessita controle do calor aplicado a peça, como em chapas finas ou por motivos metalúrgicos o processo adapta-se muito bem. Além disso, possibilita maior variação na posição de soldagem, realizando um cordão contínuo sem a mudança dos parâmetros.[9]

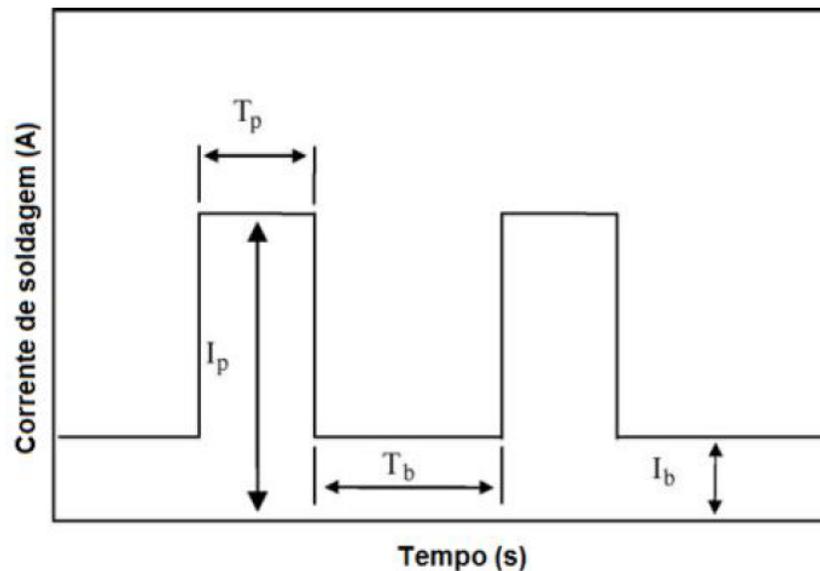


Figura 5 - Variáveis no processo de soldagem por corrente pulsada. (I_p = corrente de pico; I_b = corrente de base; T_p = tempo de pico; T_b = tempo de base.)[10]

A energia de soldagem para o processo pulsado pode ser calculado através da Equação 1: [11]

$$H = \frac{60 \cdot V (I_p \cdot t_p + I_b \cdot t_b)}{v (t_p + t_b)} \quad (1)$$

I_p = corrente de pico (A)

I_b = corrente de base (A)

t_p = tempo de pico (s)

t_b = tempo de base (s)

H = energia de soldagem (J/cm)

V = tensão de soldagem (V)

I = corrente de soldagem (A)

v = velocidade de soldagem (cm/min)

O processo cíclico de aumento e diminuição da corrente de soldagem cria alguns efeitos sobre a poça de fusão, principalmente sob a temperatura da poça como

mencionado anteriormente, que variam de acordo com os ciclos impostos pelas variáveis l_b , l_p , t_b e t_p , que por sua vez também causam movimentações do fluido aumentando as forças de convecção já existentes na poça.

3.2 GASES DE PROTEÇÃO

Os gases de proteção também atualmente conhecidos como gases de processo, possuem a função de formar o arco elétrico através da ionização desses gases e da proteção e estabilização nos processos de soldagem a arco. Atuando de forma a criar uma barreira protetora em relação a atmosfera oxidante para prevenir a formação de óxidos no eletrodo e na poça de fusão. Além disso, podem influenciar sobre a geometria, propriedades mecânicas e características metalúrgicas.

Normalmente o gás argônio é o mais utilizado para o processo de soldagem TIG, pelo fato de ser um gás inerte que não reage com os demais componentes durante a soldagem além de quesitos econômicos, por ter um menor custo entre outros possíveis gases de proteção como o hélio. Em aplicações onde se deseja aumentar a penetração e velocidade de soldagem com os mesmos valores de corrente é possível a adição de hidrogênio junto ao gás argônio, em frações máximas de 15% [12]. Neste trabalho não foram utilizadas misturas de gases pois não havia a necessidade da alta penetração do cordão de solda.

A adição de porções de hidrogênio ao argônio exige certos cuidados pois, a literatura especializada mostra que o hidrogênio é um elemento que facilmente promove a formação de trincas e poros. De maneira geral, os trabalhos encontrados sobre o assunto concordam que as trincas de hidrogênio ocorrem quando quatro situações ocorrem simultaneamente: hidrogênio presente no metal de solda, microestrutura dura e frágil, elevadas tensões na região soldada, e temperaturas relativamente baixas (menores que 473 K (200 °C)), sendo que o H_2 tem maior solubilidade em metais que possuem estrutura cristalina CFC do que em metais com estrutura CCC. [12]. O aumento da taxa de penetração em função da adição de hidrogênio ao argônio é mostrado na Figura 6.

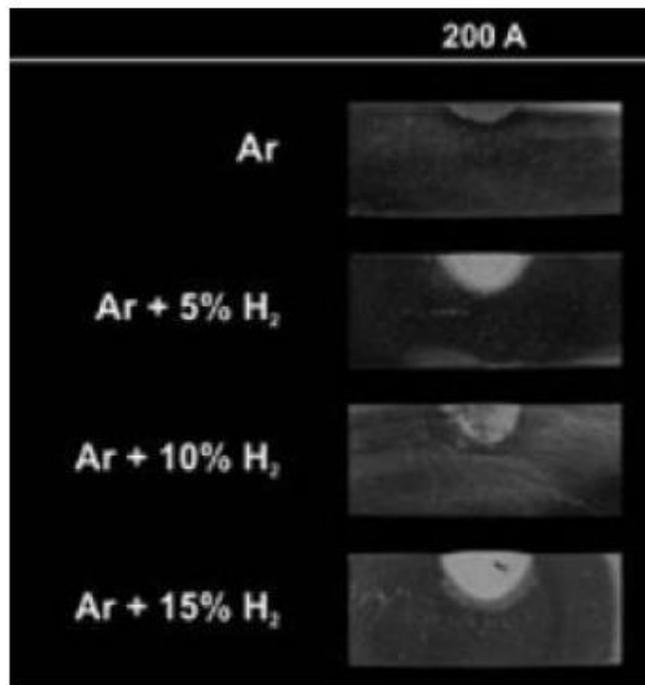


Figura 6 - Influencia da adição de gás de hidrogênio ao gás de proteção argônio sobre os parâmetros de penetração da soldagem.[7].

3.3 MODOS DE TRANSFERÊNCIA METÁLICA

No processo de soldagem TIG, um fator que usualmente  motivo de precauções,  a possibilidade de contaminação da ponta do eletrodo de tungstênio através da deposição do material que está sendo soldado. Neste caso, ocorrendo a contaminação,  necessário realizar novamente a afiação e conforme o nível, a troca do eletrodo. Somente desta forma a emissão termiônica não  prejudicada. A título de ilustração,  mostrado na Figura 7 a variação da temperatura em relação ao arco elétrico.

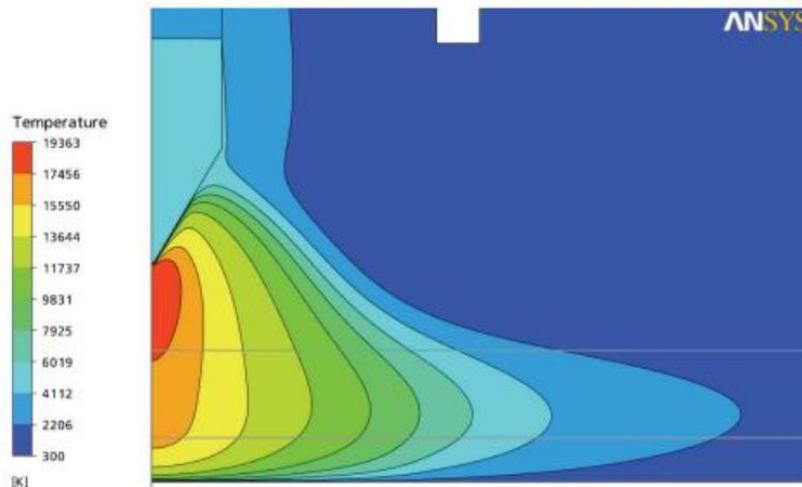


Figura 7 - Variação genérica da temperatura ao longo do arco elétrico de soldagem TIG.[13]

Existem dois modos de transferência metálica, denominados como transferência por ponte e intermitente. No chamado modo ponte, ocorre a transferência do metal de adição para a poça fundida de forma contínua e ininterrupta, havendo sempre a continuidade da alimentação na poça de fusão. Em contrapartida, no modo intermitente não há contato constante do metal de adição com a poça fundida. Nesse modo de transferência, tendem a ser criada uma gota de arame fundido na ponta do metal de adição, que por efeitos de tensão de superfície, cresce até um determinado volume, até se desprender do arame e ser depositada na poça de fusão. O modo de transferência metálica pode ser alterado com a pequena mudança de parâmetros de soldagem como a corrente aplicada ou a velocidade de arame. Até mesmo com a simples variação do ângulo de inserção do arame na poça. Estudos identificaram mudanças no modo de transferência de ponte para intermitente variando apenas $1,5^\circ$ no ângulo de inserção do arame [5]. Ambos modos de transferência metálica são mostrados na Figura 8.

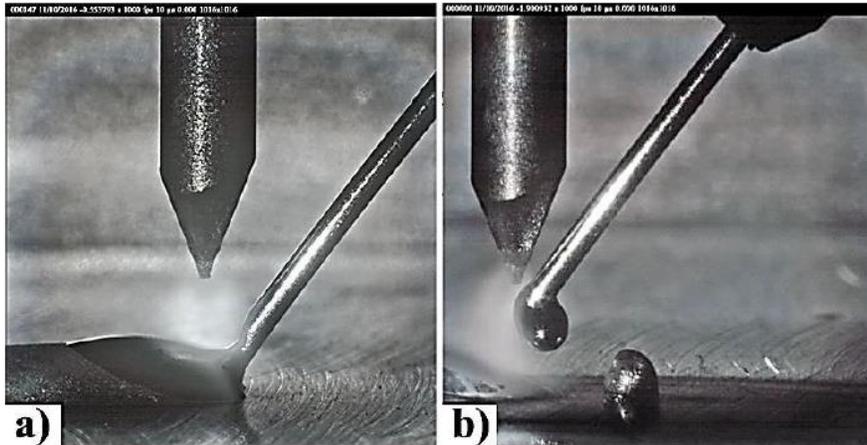


Figura 8 - Modos de transferência metálica: a) Ponte; b) Intermitente.[5]

Em aplicações como vertical ascendente, vertical descendente e sobre cabeça, o modo de transferência metálica por ponte possui maior vantagem pois o contato entre a poça e metal de adição ocorre de forma a atrair o metal que está sendo depositado para a poça de fusão. Esse efeito gera força contrária, de forma a anular, as forças gravitacionais presentes nestas posições de soldagem.

3.3.1 Comportamento da poça de fusão ao longo das posições de soldagem

Existem alterações no comportamento da poça de fusão ao longo das posições de soldagem plana, vertical e sobrecabeça pela influência da constante gravitacional e de forças eletromagnética, podendo resultar em instabilidades no processo, mostrados na Figura 9.[14]

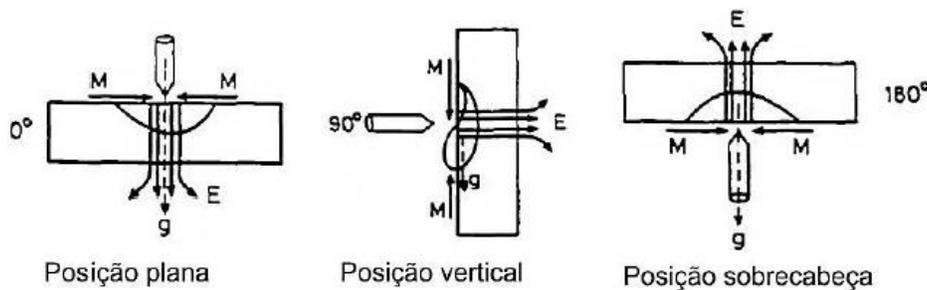


Figura 9 - Influência da força gravitacional (g), forças eletromagnéticas (E) e tensão de superfície (M) na poça de soldagem.[14]

Observa-se que a força gravitacional (g) e eletromagnética (E) possuem a mesma direção e sentido na posição plana, promovendo maior penetração. Na posição vertical (ascendente ou descendente) a força gravitacional atua de modo a escorrer o metal na direção do vetor da gravidade. No sentido vertical ascendente a poça de fusão tende a escorrer no sentido oposto à direção de soldagem promovendo uma fina camada de metal líquido que tem como consequência o aumento da penetração pelo contato direto com o metal de base. Entretanto no sentido vertical descendente a poça de fusão tende a escorrer para o mesmo sentido da direção de soldagem criando uma barreira entre o arco elétrico e o metal de base, diminuindo assim a penetração resultante na área. Na posição sobrecabeça também há a tendência a ter-se menor penetração pelo fato do vetor da constante gravitacional ser oposto a direção em que o metal está sendo depositado. Neste caso, a tensão de superfície sustenta o metal líquido, porém, em termos de processo, utiliza-se uma poça pequena afim de reduzir instabilidades e atingir maior equilíbrio.[15][16][17]

Shipilov [18] e outros afirmam que para valores de velocidade de arame baixas e constantes o arco elétrico tende a formar uma barreira e impedir a chegada do metal de adição na poça, alterando o modo de transferência para intermitente, aumentando o tamanho da gota na ponta do arame. Por tal fator, identifica-se que para menores velocidades de arame, há ainda maior a probabilidade de contaminação para posições fora da posição plana.

Além disso, foram identificadas alterações no modo de transferência metálica ao longo de soldagem orbital pelo fato de haver alterações do vetor da constante de força gravitacional ao longo do processo e conseqüentemente o modo de transferência metálica [19]. Um grande problema conhecido no campo de soldagem através do processo TIG alimentado, é o atrito do metal de adição ao longo do conduíte que o conduz até a tocha de soldagem. Caso seja alto ou haja dobramentos ao longo do conduíte, há impactos na homogeneidade da alimentação podendo alterar o modo de transferência metálica. A curvatura do arame devido a deformação no processo de bobinamento também são fatores que impactam a transferência metálica pois no final da bobina a deformação imposta é maior devido o menor diâmetro do centro da bobina, analogamente

essa deformação é transferida a tocha impactando no modo como o arame incide na poça de fusão.

3.4 PROCESSOS DE SOLDAGEM ORBITAL E CIRCUNFERENCIAL

Existem duas vertentes principais para o processo de união de tubos, conhecidos como soldagem orbital e soldagem circunferencial ou estacionária. No processo de soldagem orbital, é instalado um equipamento de soldagem no tubo que será soldado que promove o movimento circular da tocha de soldagem ao redor do tubo. Já na soldagem circunferencial ou estacionária, existem aparatos que promovem a movimentação do tubo e a tocha permanece fixa em uma mesma posição. Devido ao fato de a tocha permanecer parada no processo de soldagem circunferencial, há geralmente maior facilidade de controlar os parâmetros e realizar a solda, visto que a posição de soldagem é sempre a mesma. [20]

No trabalho atual, utilizou-se o processo de soldagem orbital devido à dificuldade de acesso e pelo fato de não ser possível a movimentação dos componentes que irão sofrer o processo de soldagem. O processo de soldagem orbital possui maior utilização devido a sua maior aplicabilidade em campo, onde é necessário a realização de soldas de união e reparos de tubos onde não é possível a movimentação dos mesmos. [20]

Na soldagem circunferencial existe a possibilidade da aplicação de maior variedade de processos, como plasma com a adição de pó e arco submerso os quais não são possíveis na soldagem orbital pois não são possíveis fora da posição de soldagem plana, o arco submerso possui uma camada de fluxo granular na qual não pode ser colocada fora da posição plana, por exemplo. Entretanto os processos MIG/MAG, TIG e Eletrodo Revestido podem ser aplicados em todas as posições e já possuem aplicabilidade difundida nas indústrias naval, de petróleo e gás e alimentícia. [21]

Como mencionado anteriormente, o processo TIG possui maior possibilidade de controle da energia aplicada no componente que está passando pelo processo de soldagem, possibilitando maior controle sobre as propriedades metalúrgicas de aços,

principalmente aços inoxidáveis martensíticos, austeníticos e Duplex (austeno-ferríticos) pois estas ligas são suscetíveis a transformações microestruturais que afetam a resistência a corrosão e resistência mecânica. [22] [23]

A Figura 10 representa o modo como são divididas as posições da soldagem orbital de forma similar a um relógio para facilitar a identificação das regiões ao longo do tubo.

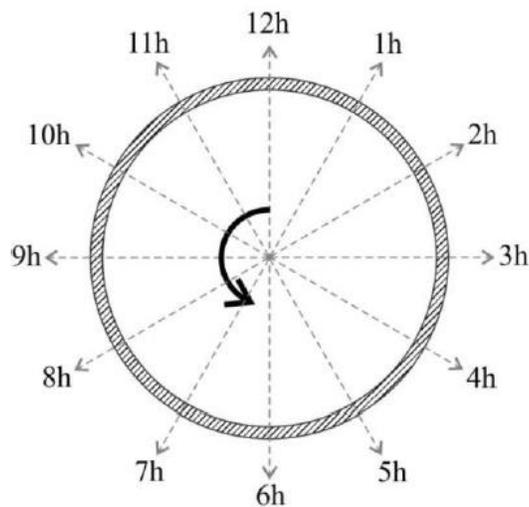


Figura 10 - Posições de soldagem convencionadas ao longo do tubo. [Adaptado de 12]

A Figura 11 mostra o diagrama de posições do tubo, mapeando as posições de soldagem ao longo do tubo variando-o entre 0° e 90° e variando a posição da tocha de soldagem mostrando qual a respectiva posição de soldagem que representa.

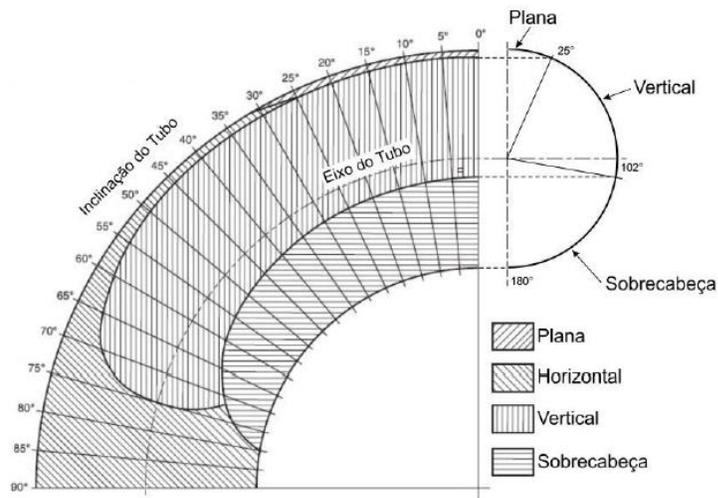


Figura 11 - Diagrama de posições de soldagem ao longo da circunferência do tubo (posição 5G).[24]

Esse mapeamento das posições, na atual posição 5G, possui a vantagem de se fazer comparações entre posições de soldagem. Quando o tubo está posicionado à um ângulo de 90° em relação ao chão, conforme mostrado no diagrama, sua posição de soldagem é puramente horizontal. Assim tem-se a compreensão de que para chapas posicionadas na mesma posição horizontal o comportamento da poça de fusão será o mesmo que para tubos posicionados a 90° auxiliando a criação de procedimentos de soldagem e desenvolvimento de novos métodos.

3.4.1 Cabeçotes de soldagem orbital TIG

Os cabeçotes de soldagem orbital possuem vantagens em determinados aspectos comparados a operações feita manualmente. Quando feita uma parametrização adequada, garantem em sua maioria, maior uniformidade do cordão de solda obtido, maior produtividade. A Figura 12 mostra alguns dos modelos de cabeçote encontrados atualmente no mercado e o modelo 81 da empresa *ArcMachines®* que será usado neste trabalho.

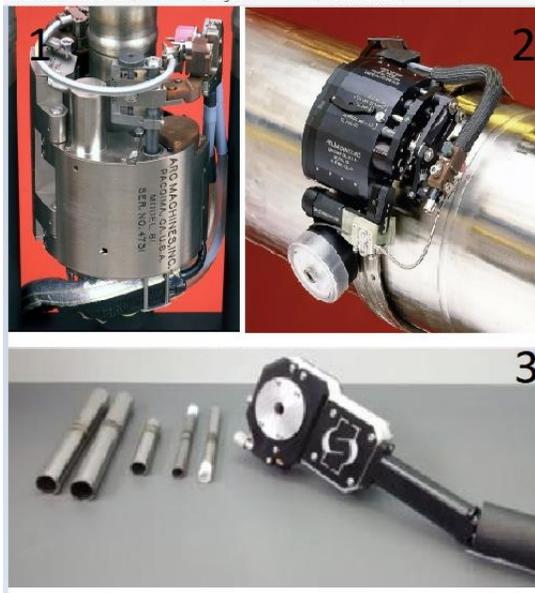


Figura 12 - Cabeçotes de soldagem orbital TIG: 1) Cabeçote ArcMachines® 81 (utilizado neste trabalho) 2) Cabeçote ArcMachines® para tubos de grande diâmetro 3) Cabeçote com Câmara fechada LabSolda.

Devido a independência entre o sistema de alimentação do arame e a tocha de soldagem há maior flexibilidade das dimensões de seus componentes. Em outros casos assim como adaptações para soldagens em espaços reduzidos há também a possibilidade de soldagem do diâmetro interno de tubos ou os chamados “*Narrow Gaps*”. Nessa técnica (“*Narrow Gap*”) a abertura de chanfro em tubos espessos, é menor, visando redução de custos com trabalhos de usinagem dos chanfros, quantidade de material de adição e afins. [25].

3.5 AÇOS INOXIDÁVEIS

Os aços inoxidáveis são ligas que possuem o elemento ferro (Fe) como base e em maior quantidade e contém adições de outros elementos de liga como o Cr, Ni, Mo, Cu, N, S e Se. Para ser considerado um aço inoxidável é necessário um percentual mínimo de 11% de cromo (Cr). O Cr promove a formação de uma fina camada de superfície de óxido rica em Cr, essa película dá a característica inerte dos aços inoxidáveis, que podem ser divididos em: [26]

- **Austeníticos:** São ligas não-magnéticas de ferro-cromo-níquel contendo tipicamente 8% de níquel, com baixo teor de carbono. Apresentam boas propriedades mecânicas, boa soldabilidade, trabalhabilidade a frio e resistência à corrosão. Podem ser endurecidos por deformação e, neste estado, são ligeiramente magnéticos. A adição de elementos de liga como o molibdênio e a redução do teor do carbono melhoram sua resistência à corrosão. Os corpos de prova utilizados neste trabalho são fabricados de aço inoxidável austenítico 304 e o arame de alimentação de aço inoxidável austenítico 309LSi.
- **Ferríticos:** São ligas ferro-cromo contendo de 12 a 17% de cromo com baixo teor de carbono. Não são endurecíveis por tratamento térmico. São magnéticos e apresentam boa resistência à corrosão em meios menos agressivos, boa ductilidade, razoável soldabilidade. O trabalho a frio os endurece moderadamente.
- **Martensíticos:** São ligas de ferro-cromo contendo de 12 a 14% de cromo e com alto teor de carbono. São endurecíveis por tratamento térmico e magnéticos. Quando temperados são muito duros e pouco dúcteis, e é nesta condição que são resistentes à corrosão. Quando recozidos não apresentam bom comportamento frente à corrosão atmosférica.

Além disso, existem os aços inoxidáveis duplex (onde há a presença de fases austenítica e ferrítica em conjunto) mesclando as propriedades mencionadas acima de acordo com o percentual de cada fase encontrado no aço. [26][9]

O aço inoxidável é amplamente utilizado em indústrias dos mais variados setores como alimentícias, petroquímica, química, saúde e afins pelo fato de possuir maior resistência a corrosão e aumentando a durabilidade de máquinas e equipamentos.

3.6 TECIMENTO

O movimento oscilatório do manipulador, denominado como tecimento é o método de movimentação da tocha durante o processo de soldagem no sentido de ziguezague. Para a realização do método é necessário que o equipamento de soldagem possua um eixo dedicado para a movimentação do manipulador, essa movimentação ocorre ao longo da área que está sendo submetida ao processo de soldagem.

O tecimento aumenta a distribuição do metal líquido ao longo da junta, manipula a forma com o material é depositado e pode aumentar a distribuição de calor ao longo da peça, por tal fato, é comum sua utilização em soldagem de preenchimento de chanfros em tubos.

O método possui alguns benefícios em relação a utilização sem tecimento, por exemplo, é possível obter maior agitação da poça de fusão, maior área resultante do cordão de solda e maior produtividade, pois em alguns casos reduz o número de passes necessários. [27]

A Figura 13 ilustra um representação esquemática das variáveis inerentes do tecimento. É possível variar a frequência de tecimento, o tempo de parada nas extremidades e no meio do percurso e a amplitude de deslocamento. A linha descontinua representa o meio da junta.

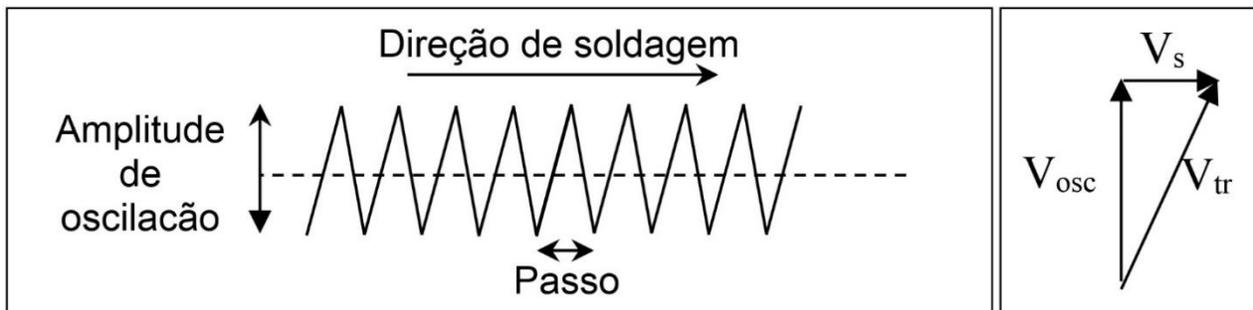


Figura 13 - Variáveis referentes ao método de oscilação da tocha de soldagem

3.7 SOLIDIFICAÇÃO

A solidificação é o processo de transformação do estado líquido para o estado sólido do metal, o processo é controlado pela Energia livre de Gibbs da fase líquida em

relação a fase sólida (ΔG_v), a Figura 14 mostra a relação da Energia livre de Gibbs em relação a temperatura[28][29].

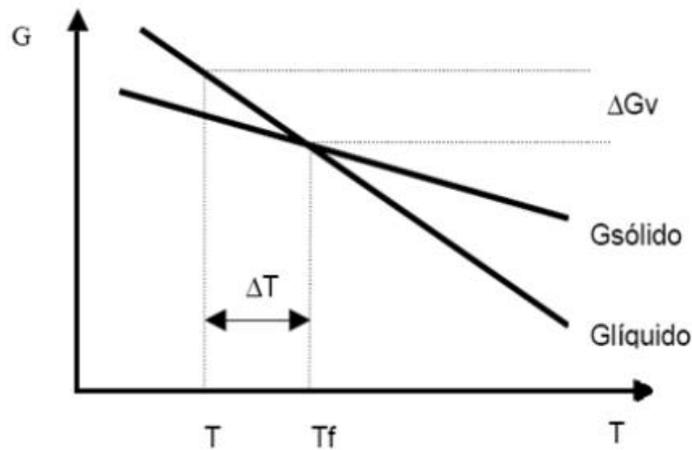


Figura 14 - Relação da Energia livre de Gibbs e a Temperatura.[29]

O processo de solidificação ocorre quando há a diminuição da temperatura abaixo da temperatura de solidificação (chamada de T_f na Figura 14), com essa diminuição ocorre a criação de uma força termodinâmica capaz de iniciar o processo de solidificação. A diminuição da temperatura é chamada de super resfriamento e será maior conforme a diferença das temperaturas T e T_f . [29]

Com a diminuição da temperatura abaixo da temperatura de solidificação (T_f), começam a ocorrer aglomerações de átomos que são chamados pontos de nucleação. Com a formação desses aglomerados ocorre também a alteração de fases do metal, que por consequência, diminui a energia livre do sistema, entretanto na interface desses novos núcleos e o restante do líquido há o aumento da energia livre do sistema. Caso a energia dessa energia resultante da interface sólido/líquido for maior que a energia necessária para a mudança de fase a solidificação continua ocorrendo, caso não, o núcleo volta a se tornar líquido. [30]

A nucleação pode ocorrer de forma homogênea ou heterogênea tendo influência de como ocorreu o início da solidificação, em aplicações gerais e industriais o usual é a ocorrência da nucleação heterogênea pelo fato de sempre haver impurezas

localizadas que diminuem a energia livre do sistema e promovem a solidificação de forma heterogênea. [31]

No processo de solidificação na soldagem os fatores que possuem influência são: a composição química da poça de fusão, o gradiente térmico na interface sólido-líquido e a velocidade de solidificação.[31][30]

3.7.1 Solidificação na poça de fusão

Existem modelos que indicam a influência da zona parcialmente fundida do metal de base sobre a solidificação da poça de fusão, alguns modelos defendem a teoria que a temperatura de solidificação é menor em alguns pontos que o valor médio da temperatura de fusão da liga, isso ocorre pois há segregação de elementos de liga na solução metálica líquida para contornos de grão, diminuindo pontos específicos a temperatura de solidificação.[29][30][32][33]

O processo de solidificação ocorre partindo da zona parcialmente fundida que determina a orientação cristalina da solidificação pois a partir de tal zona ocorre o início da solidificação, essa etapa é chamada de crescimento epitaxial. Pelo fato da força motriz para a criação de novos grãos ser baixa a solidificação ocorre com a mesma direção cristalográfica da zona afetada pelo calor. A Figura 15 mostra o processo de solidificação epitaxial.

Após a zona epitaxial a forma de crescimento de grão é alterada para um modo chamado crescimento competitivo de grãos, os grãos que possuem orientação favorável ao gradiente de temperatura máximo (poça de fusão) tendem a crescer mais que os grãos que não possuem essa orientação favorável, a direção $\langle 100 \rangle$ é a direção mais favorável nos materiais de estrutura cristalina CCC e CFC. O esquema é mostrado na Figura 15.[32]

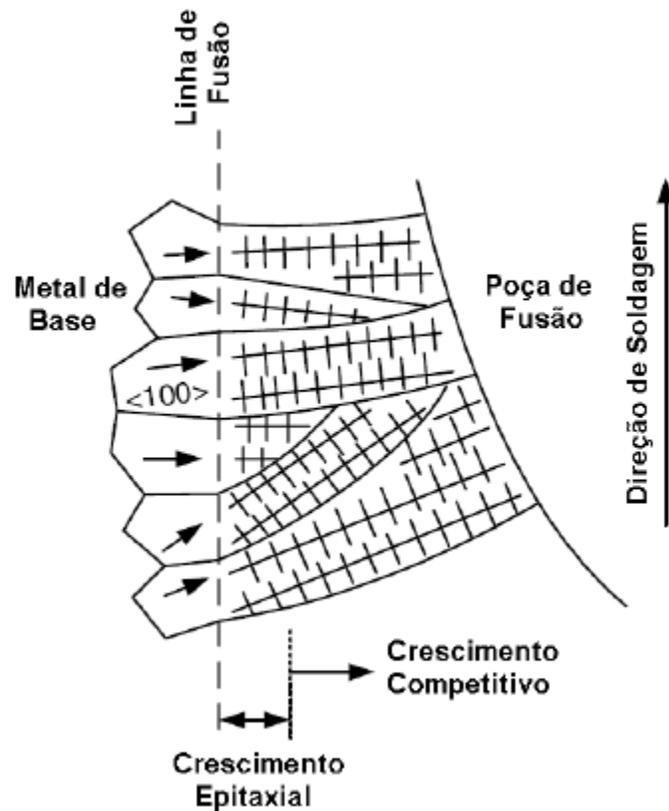


Figura 15 - Modos de crescimento epitaxial e competitivo dos grãos em direção a poça de fusão.[32]

Os parâmetros impostos no processo de soldagem tem grande influência sobre a microestrutura que será formada no metal, por exemplo a velocidade de soldagem. Em velocidades de soldagem elevadas a poça possui um formato similar a uma gota e os grãos tendem a crescer sem ramificações em direção ao centro da poça de fusão. Para menores velocidades de soldagem a poça de fusão possui um formato oval e o crescimento de grãos ocorre de forma ramificada e curvos em direção a poça de fusão.[33]

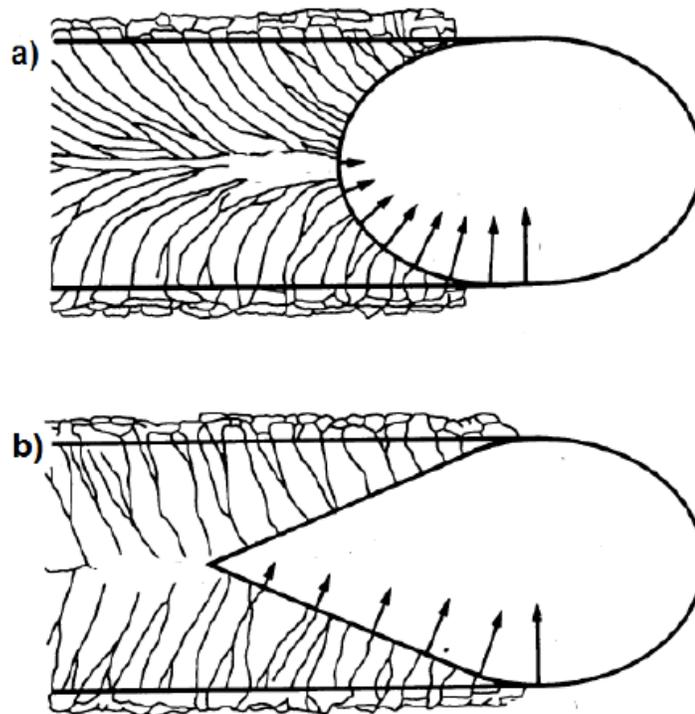


Figura 16 - Influência da direção de crescimento dos grãos em relação a velocidade de soldagem: a) baixa; b)alta.[29]

As Equações 5 e 6 mostram a influência da velocidade de soldagem (v) sobre a velocidade de solidificação (R). A poça de fusão se move em uma direção normal (n) em um intervalo de tempo (t), a Figura 17 esquematiza os vetores de velocidade de solidificação (R), velocidade de soldagem (v) e direção normal da poça de fusão (n).

$$Rndt = (Vdt)\cos\alpha = (Rdt)\cos(\alpha - \beta) \quad (5)$$

Dividindo os termos por $\cos(\alpha - \beta).dt$ obtém-se:

$$R = \frac{V\cos\alpha}{\cos(\alpha - \beta)} \quad (6)$$

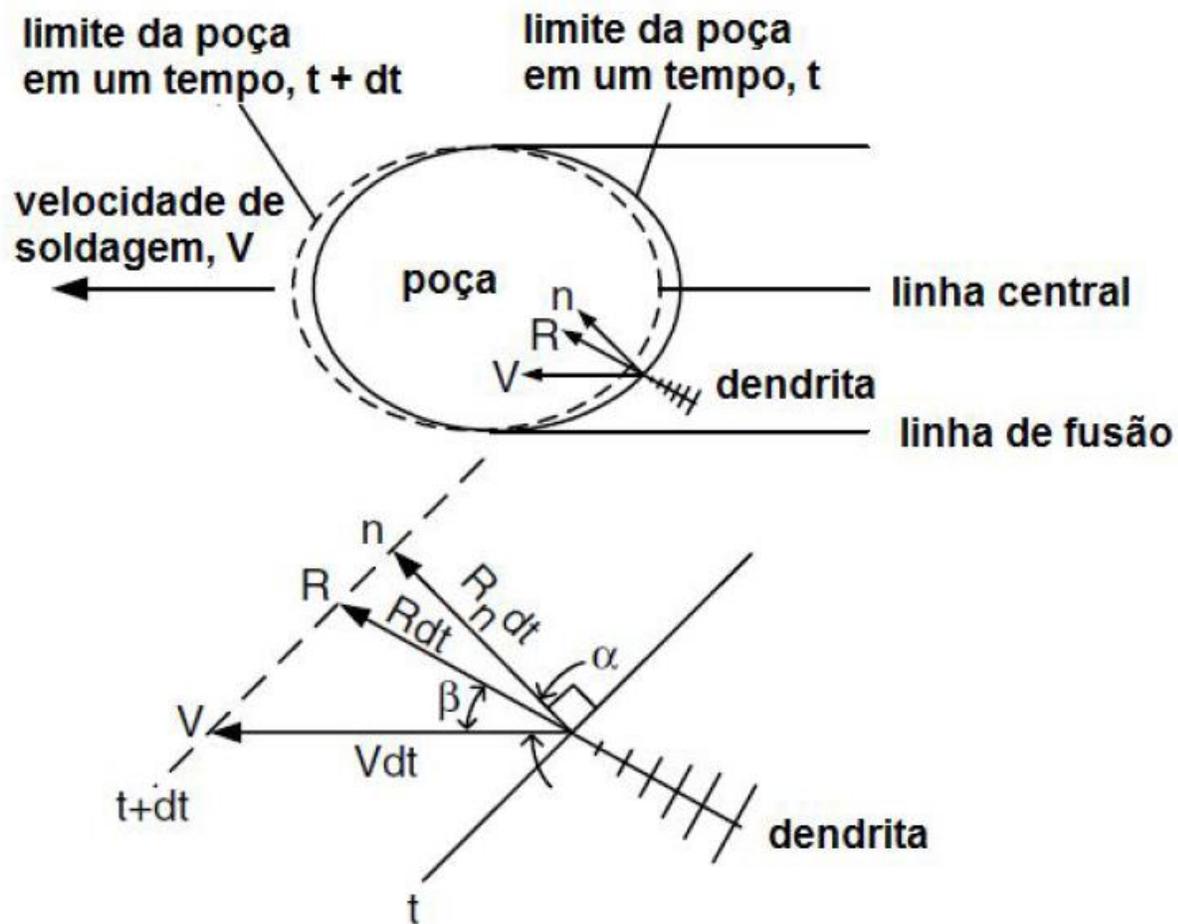


Figura 17 - Esquema geométrico da relação entre a velocidade de soldagem (v) e a velocidade de solidificação (R) [32]

A variável α representa o ângulo entre a variável normal (n) e a velocidade de soldagem (V), a variável β representa o ângulo entre a variável de velocidade de solidificação (R) e velocidade de soldagem (V). Esse modelo considerou materiais com direção cristalina $\langle 100 \rangle$ para estruturas CCC e CFC. Fixando um período de tempo, a variação entre α e β pode ser descrita como nula, e a equação pode ser reescrita como mostrado na Equação 7. [32], [33]

$$R = V \cos \alpha \quad (7)$$

A Figura 18 mostra a influência da posição na gota sobre a velocidade de solidificação (R), na linha central da poça de fusão, a velocidade de solidificação (R) tende a ser a máxima, a mesma que velocidade de soldagem (v). Próximo a linha de fusão

ocorre o oposto proposto pelo modelo, onde o $\cos\alpha$ tende a zero, a velocidade de solidificação é mínima.[29],[30]

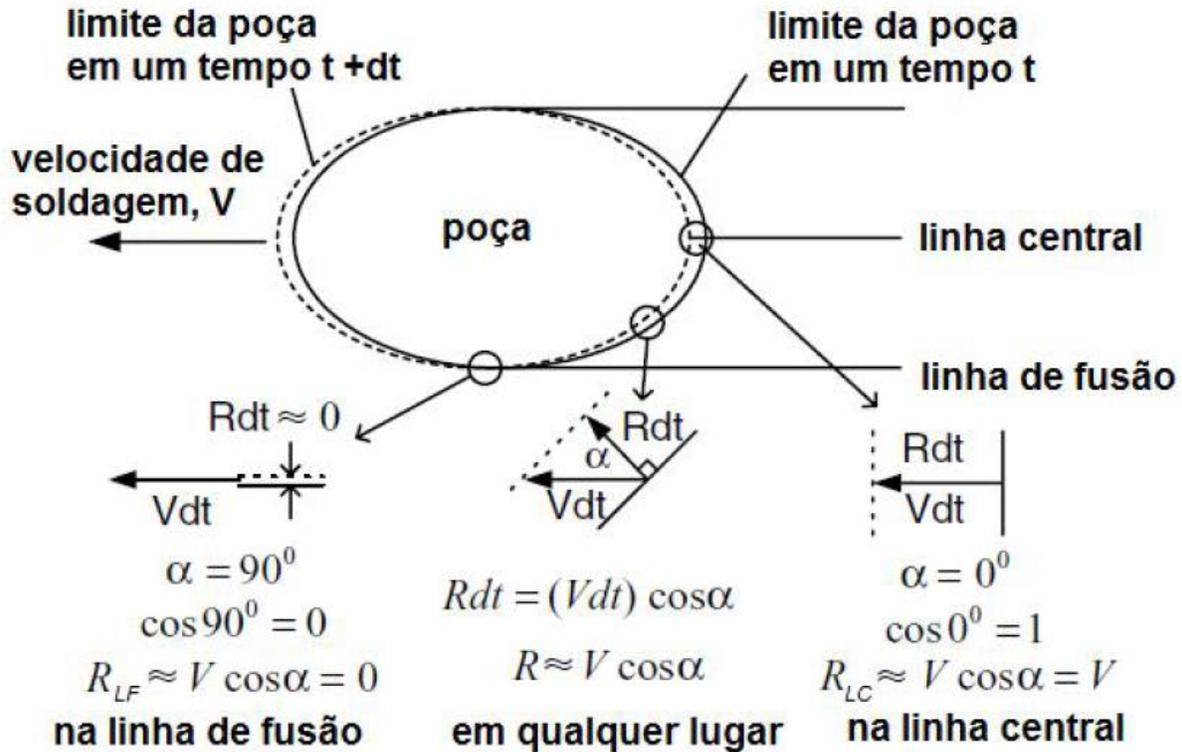


Figura 18 - Variação da velocidade de solidificação (R) ao longo da poça de fusão.[10]

3.7.2 Formação de grãos na poça de fusão

Além do crescimento epitaxial descrito anteriormente, existem outros modos de crescimento de grão que podem ocorrer no processo de soldagem, esse crescimento resulta em estruturas mais refinadas aumentando a resistência mecânica do metal e diminuindo a probabilidade de ocorrerem trincas a quente. [32], os novos grãos podem ser gerados a partir de tais mecanismos:

- **Fragmentação de dendritas:** Este fenômeno ocorre devido a movimentação em sentido de convecção da poça de fusão. Os fragmentos gerados das dendritas atuam como inibidores de crescimento de grão e multiplicadores da estrutura cristalina.

- **Destacamento de grãos:** O fenômeno ocorre pelo destacamento de grãos da zona parcialmente fundida do metal. O efeito também é gerado pelas forças de convecção existentes na poça de fusão. Esses grãos atuam como agentes nucleantes para novos grãos na região da solda. Ambos os processos de fragmentação de dendritas e destacamento de grãos podem ser gerados utilizando pulsações de corrente e oscilações da tocha de soldagem.
- **Nucleação heterogênea:** Utiliza-se partículas de segunda fase inoculadas ao metal de adição que atuam como nucleadores. O aumento da quantidade de nucleadores é diretamente proporcional ao aumento dos sítios de nucleação, que por sua vez, gera refino dos grãos no cordão de solda. Além disso utiliza-se a agitação da poça de fusão para reduzir a temperatura da poça e estimular a solidificação.
- **Nucleação na superfície:** Ocorre maior taxa de resfriamento na superfície da poça de fusão. A atuação de maior fluxo de gás gera resfriamento da poça o efeito também pode ser obtido através da remoção da energia de soldagem. A nucleação de fase sólida tende a ocorrer no sentido da superfície ao interior da poça de fusão, próximo a interface com o substrato, pelo fato dos núcleos de solidificação possuírem maior densidade que o metal fundido ao redor.

4 MATERIAIS E MÉTODOS

4.1 SISTEMA DE SOLDAGEM ORBITAL COMERCIAL

O equipamento comercial fabricado pela empresa *Arc Machines®*, fonte de soldagem M227 e cabeçote de soldagem M81 foram avaliados para dar embasamento futuro para criação do equipamento próprio e a parametrização necessária do cordão.

A fonte de soldagem é compacta e tem a proposta de ser facilmente utilizada em campo, possui a capacidade máxima para a geração de corrente contínua de soldagem de 200 A, memória interna para até 100 diferentes programas de soldagem e acompanha unidade de refrigeração na sua parte inferior. A Figura 19, ilustra o modelo da fonte descrita.



Figura 19 - Fonte de soldagem M227

Utiliza-se, ligado a fonte, um cabeçote de soldagem compacto destinado para a união de tubos de caldeiras, esse cabeçote é acoplado no tubo onde será realizado o procedimento de soldagem, possuindo a possibilidade de adequação a diferentes

diâmetros de tubos, alterando somente as presilhas de sustentação, as quais são fixadas no tubo de acordo com o diâmetro. O equipamento é ilustrado na Figura 20.



Figura 20 - Cabeçote de soldagem M81

No presente trabalho, o ajuste dos parâmetros de soldagem foi realizado através de uma interface conectada à fonte de soldagem. Essa interface funciona como um tipo de controle remoto, o qual permite a alteração de todos os parâmetros durante a soldagem. Além disso, além da regulagem dos parâmetros em tempo real, esta interface possui uma máscara de soldagem integrada, conforme a Figura 21.



Figura 21 - Controle remoto da fonte com máscara de soldagem acoplada.

Para possibilitar que o cabeçote execute a soldagem na configuração geométrica desejada foi necessário a adaptação através de um suporte criado, a partir de materiais disponíveis no laboratório. Nesse sistema em que o cabeçote é preso em um tubo e a uma estrutura metálica de sustentação de forma que o eletrodo de tungstênio ficasse apontado para a parte inferior do tubo (posição 2G). A Figura 22 mostra o sistema de soldagem adaptado.



Figura 22 - Bancada de ensaios: (1) – Fonte de soldagem; (2) – Cabeçote de soldagem e estrutura de sustentação; (3) – Controle remoto integrado.

O cabeçote de soldagem orbital, possui eixos de movimentação no sentido “Z”, servo motor que possibilita a movimentação ao redor do tubo e sistema. A bobina de arame de adição é acoplada ao cabeçote. Os sistemas são mostrados nas Figuras 23 e 24.



Figura 23 - Cabeçote de soldagem - (1) - Corpo de prova

A parte inferior do tubo foi usinada para que houvesse a fixação e troca dos corpos de prova de maneira rápida e fácil. Além disso foi desenvolvido uma presilha para fixar os corpos de prova na posição desejada, conforme ilustrado na Figura 24.

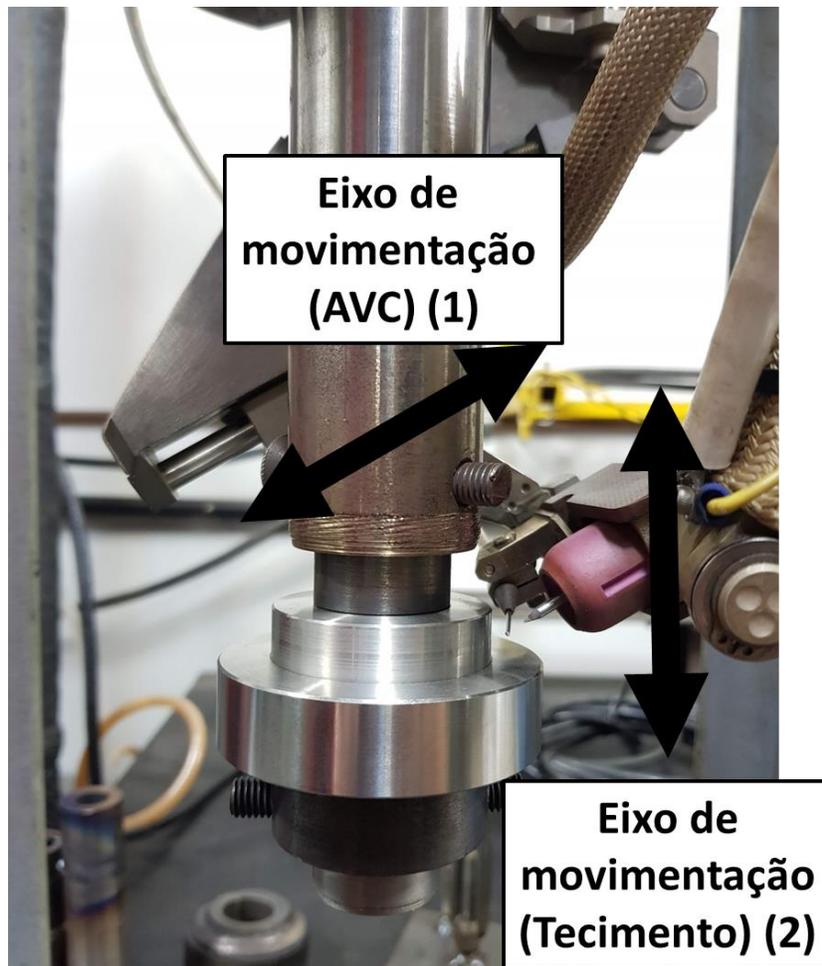


Figura 24 - (1) - Eixo de Movimentação em "Z" / Eixo de Tecimento; (2) - Eixo de movimentação AVC

O sistema de soldagem permite a configuração de algumas variáveis como: valores de corrente durante o pulso e base, velocidade de soldagem, velocidade de alimentação de arame, tempo de pulso e base, tempo de pré e pós purga do gás de proteção, tensão de referência do AVC, curvas de subida e descida da corrente e velocidade de soldagem, amplitude e tempo de parada do modo de tecimento. Todos os valores podem ser alterados durante o processo de soldagem caso seja necessário algum ajuste.

4.1.1 Parametrizações admitidas pelo sistema de soldagem comercial

O sistema de soldagem possui a possibilidade de alteração de alguns parâmetros, visando adequar-se ao material, tipo de união e dimensões do objeto que sofrerá o processo de soldagem. Ao ligar-se o equipamento pela primeira vez, é necessário a criação de um programa de soldagem, configurar o modelo de cabeçote que será utilizado, enunciar o tipo de material que será soldado e as dimensões do componente.

É possível a configuração dos seguintes parâmetros dentro dos respectivos intervalos, mostrados abaixo:

Tabela 1 - Parâmetros de possível configuração na fonte de soldagem

Parâmetro	Mínimo	Máximo	Unidade de medida
Corrente de pulso	3	225	Amperes
Corrente de base			
Tempo de pulso	0	9,99	segundos
Tempo de base			
Velocidade de arame pulso	0	5	m/min
Velocidade de arame base			
Atraso alimentação arame	0	99	
Atraso parada arame	0	99	
Pré-gas	1	999	segundos
Pós-gas	0	999	
Subida da corrente	0	99	
Descida da corrente	0	99	
Velocidade de rotação	0	6,3	m/s
Atraso de início rotação	0	99	segundos
Direção de rotação	Sentido horário / sentido anti-horário		-
AVC pulso	5	20	volts
AVC base			
Atraso da atuação AVC	0	99	segundos
Atraso da parada AVC			
Modo de atuação AVC	Pulso / Base / Contínuo		-
Tecimento	Ligado / Desligado		-
Amplitude do tecimento	0	13	mm
Tempo execução percurso (tecimento)	0	9,9	segundos

Tempo de atraso nas extremidades (tecimento)	0	9,9	segundos
Modo de pulsação corrente	Ligado / Desligado / Sincronizado com tecimento		-

Na Figura 25, proposta pelo manual de instruções da empresa fabricante do equipamento, a execução de alguns parâmetros como:

- corrente elétrica (*current*);
- tempo de subida e descida da corrente (*upslope/downslope time*);
- velocidade de rotação (*rotation*);
- tempo de atraso do início da rotação (*rotation start delay*);
- alimentação de arame (*wire feed*);
- tempo de atraso para início de alimentação de arame (*wire start feed delay*);
- tempo de parada do arame antes da curva de descida (*wire feed stop delay*);
- gás (*gas*);

É mostrada em relação a um mesmo eixo de tempo entre o início e final do processo de soldagem. [34]

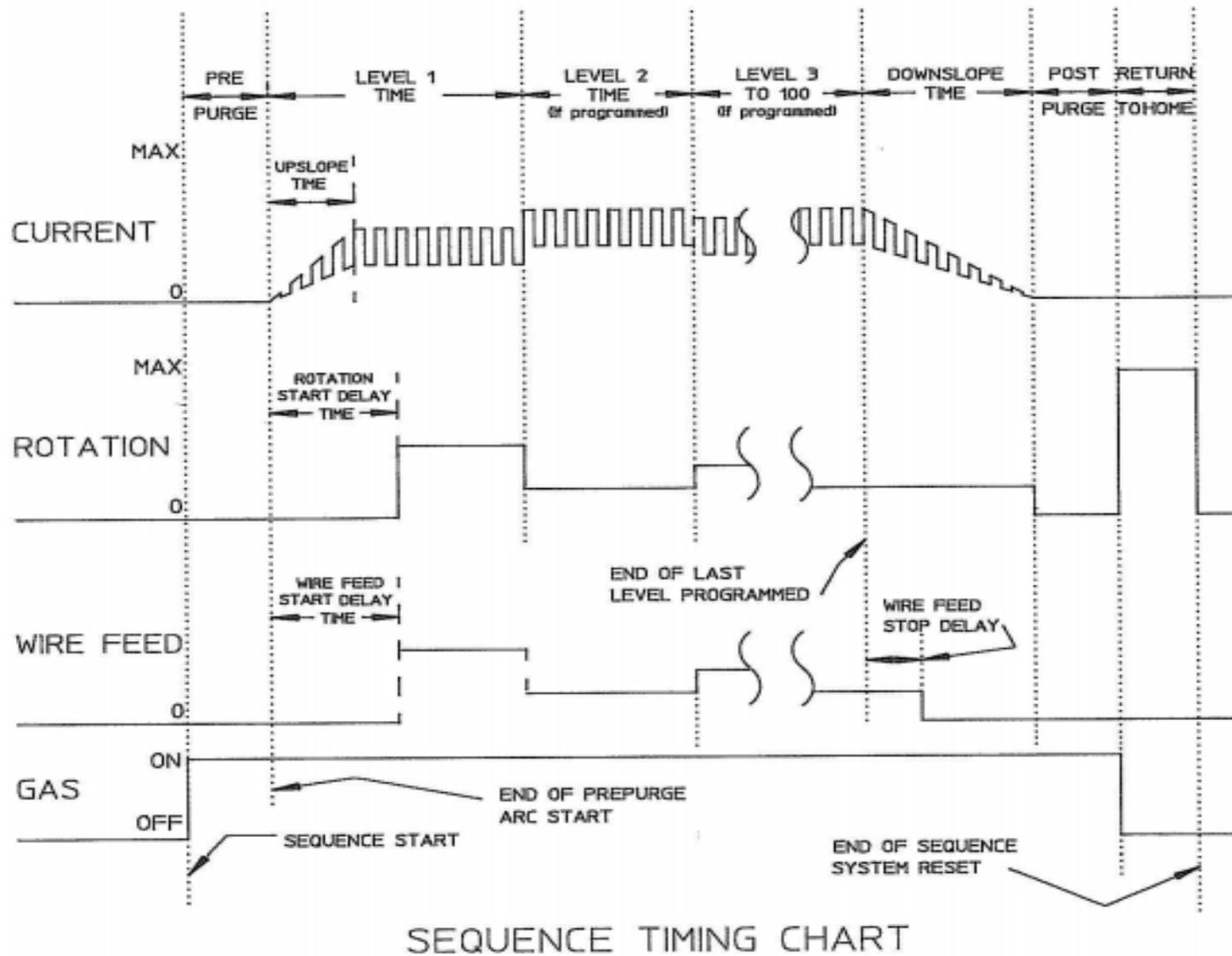


Figura 25 - Execução de algumas variáveis de processo em relação ao tempo

4.1.2 Aquisição de dados de soldagem para avaliação do sistema

Para certificar-se que os valores das variáveis obtidos durante a soldagem são de fato os valores que foram configurados na fonte de soldagem, foi utilizado o Sistema de Aquisição Portátil – SAP, fabricado pela empresa IMC Soldagem. O sistema conta com medidores de corrente, tensão e velocidade de arame e vazão de gás, que acoplados à fonte e cabeçote de soldagem aquisitam dados durante o processo, o sistema possui frequência de aquisição de 5000 Hz sendo possível realizar o tratamento dos dados para avaliação em tempo real e posteriormente.



Figura 26 - SAP - Sistema de Aquisição Portátil

4.1.3 Registro de dados de soldagem junto à fonte

O equipamento utilizado, devido ser de origem comercial e destinado ao uso industrial, possui uma impressora acoplada em que é possível realizar a impressão dos parâmetros de soldagem utilizados após o procedimento de soldagem. O intuito do sistema, segundo a fabricante, é a rastreabilidade e identificação rápida e eficaz caso haja problemas na solda.

A impressora gera todos os dados configurados dentro de um programa de soldagem, assim como descrito acima na seção, além de alguns outros dados referentes ao tempo de uso do sistema, tempo de arco utilizado no sistema, data e nome do operador.

Visto a utilização industrial do equipamento, seria interessante se o sistema possuísse algum modo de armazenamento e rastreo das soldas realizadas ou até mesmo um sistema para exportação dos dados de parâmetros utilizados anteriormente, entretanto, o sistema conta somente com a possibilidade de impressão dos parâmetros imediatamente após a soldagem. A Figura 27 mostra um exemplo do comprovante dos parâmetros, impresso pelo equipamento.

```

          ARC MACHINES, INC
    AMIWELD 227 STD3.3   COPYRIGHT 2016
    01 OCT 18           09:11:51

OPERATOR: LEANDRO_VACCARI

#  OD  WALL  MAT  POS  HEAD  PASS
009 43.05 8.60  SS   2G  81    1

PRE-PURGE-POST UP-SLOPE-DOWN ROT--DLY
  3         6  0.5   5.0  CW  0.0
SIR-WFDLY-STP RETRACT  T/MODE  STLW  OSC
  3.0    + 1.0 0.2         MAN 25  OFF
SIR-AUCDLY-STP STR/MODE RESPONSE
  1.0     0.0  RF         6

LVL PULSE     ROT     PRI-mm/MN-BCK
  1  ON       CONT    150
    TIME PRI--AMP--BCK PRI-PULSE-BCK
  1  MAN 160     120  0.20    0.20
    PRI-WF-BCK PRI--AUC--BCK  AUC MODE
  1  1016 1016 11.6         SAMP/PRI
    OSC/AMPL IN  EXC  OUT
  1

***** END *****

```

Figura 27 - Comprovante dos parâmetros de soldagem, impresso pela fonte de soldagem

4.2 CORPOS DE PROVA

Como dito anteriormente, o projeto possui especificação mínima dimensional do cordão de solda de 9,0 mm, dimensão também conhecida na terminologia de soldagem como “perna” do cordão de solda. O trabalho atual teve o foco em como realizar o empilhamento dos cordões e realizar inspeções de defeitos através de análise metalográfica e raio-X a fim de atender as especificações impostas. A Figura 28 ilustra as dimensões mínimas do cordão impostas pelo projeto.

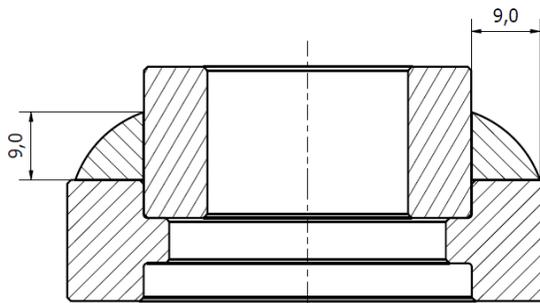


Figura 28 - Especificação dimensional do cordão de solda (tamanho mínimo)

O componente final será fabricado de aço inoxidável 304 e o material de deposição do cordão de solda será aço inoxidável 309 LSi, também foram utilizados corpos de prova de aço carbono, devido ao menor custo, para uma primeira aproximação do procedimento a ser realizado e testes visando avaliar a performance do equipamento de soldagem. A Figura 29 mostra o modelo ilustrativo do procedimento de soldagem já efetuado no corpo de prova desenvolvido.

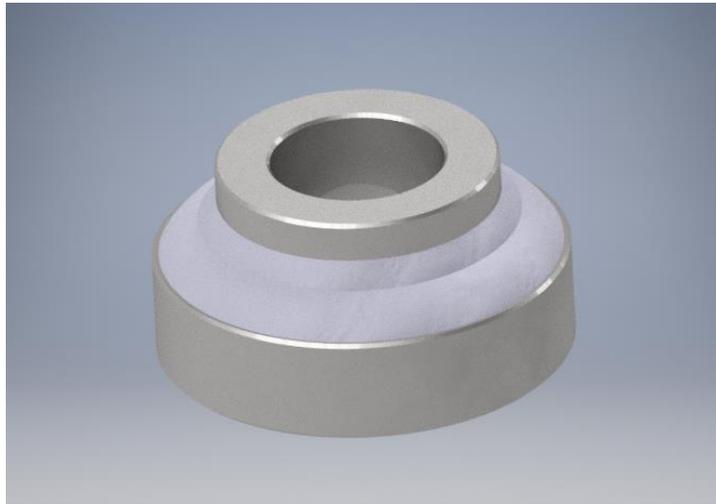


Figura 29 - Simulação da área soldada no componente

4.2.1 Corpos de Prova de Aço Carbono

Em um primeiro teste para reconhecimento e avaliação do desempenho do sistema de soldagem, foram fabricados corpos de prova de aço carbono de forma a representar a geometria do componente final. Foram utilizadas chapas e foram cortados tubos que já estavam disponíveis no LabSolda, sem a necessidade de compra, que atendiam as dimensões necessárias e representavam uma boa alternativa para testes iniciais.

A parte inferior do componente foi representada por uma chapa de aço de 8,0 mm de espessura, plana e sem óxidos em sua superfície. A parte superior do componente foi representada por um tubo com diâmetro externo de 43,0 mm e espessura de 7,0 mm também de aço carbono. Nesta etapa, a composição química exata dos componentes não foi avaliada pelo fato de serem somente para testes iniciais. A Figura 30 ilustra o primeiro modelo de corpo de prova fabricado em aço carbono.



Figura 30 - Modelo de corpo de prova fabricado em aço carbono.

4.2.2 Corpos de Prova de Aço Inoxidável

Baseando-se no desenho fornecido pelo projeto, foram criados modelos de corpos de prova, em CAD, com as mesmas dimensões do componente do projeto e visando a máxima representatividade do componente final, porém, com pequenas alterações para melhor fixação no suporte fixador dos corpos de prova. Após isso, os corpos de prova em Aço Inoxidável 304, com maior precisão dimensional, foram fabricados por uma empresa especializada, como mostrado na Figura 31



Figura 31 - Corpos de prova fabricados em Aço Inoxidável.

4.3 METODOLOGIAS DE SOLDAGEM

Partindo das suposições em conversas com os professores e outros membros do laboratório, foram pensadas as seguintes maneiras para atingir as dimensões necessárias, mostradas na Figura 32, 33, 34 e 35.

1. **Passe único:** elaborar apenas um cordão na raiz da junta.
2. **Passe único com tecimento:** elaborar apenas um cordão de solda com movimentação da tocha de soldagem no eixo “Z” (tecimento).
3. **Dois passes:** elaborar dois cordões de solda. No primeiro deles sem o tecimento e no segundo, com tecimento.
4. **Três passes:** elaborar três cordões de solda sobrepostos, sem tecimento.

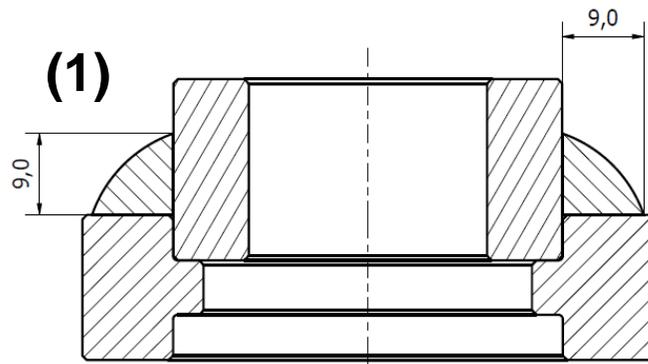


Figura 32 - (1) - Passe único (dimensões em mm)

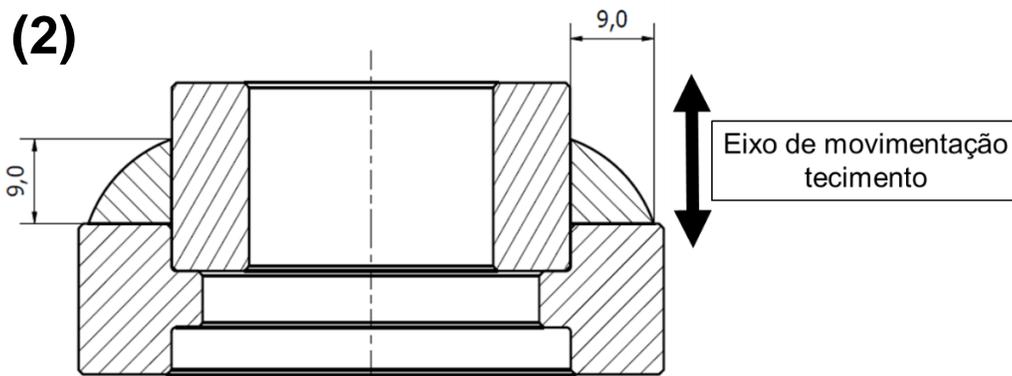


Figura 33 - (2) - Passe único com tecimento (dimensões em mm)

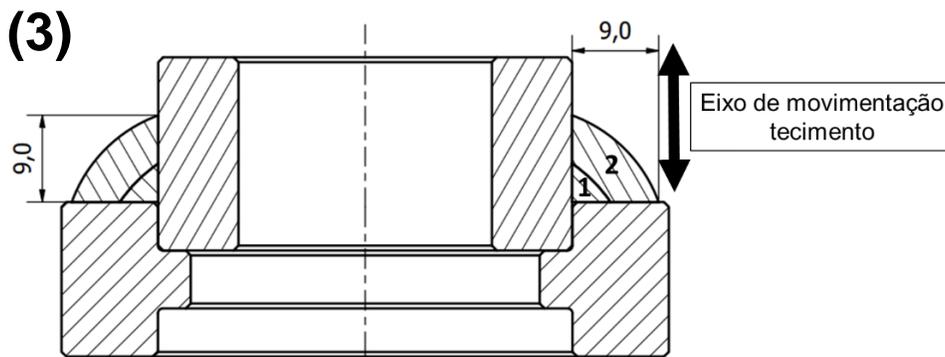


Figura 34 - (3) - Dois passes (dimensões em mm)

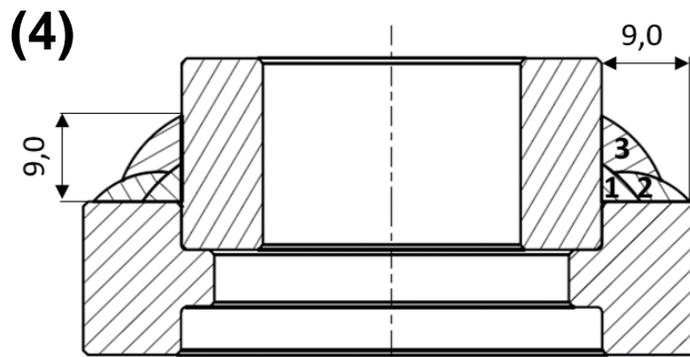


Figura 35 - (4) - Três passes (dimensões em mm)

4.4 AVALIAÇÃO DOS CORPOS DE PROVA

4.4.1 Análises Macrográficas

Inicialmente, foram realizadas em todas as amostras, cortes na seção transversal um exame visual preliminar. Após isso, foram preparadas amostras metalográficas para verificar a região que sofreu o processo de soldagem, incluindo o empilhamento dos cordões e a zona afetada pelo calor.

As amostras foram cortadas, lixadas e polidas seguindo o padrão ASTM E3-11 (*Standard Guide for Preparation of Metallographic Specimens*), os componentes foram examinados a olho nu e com o auxílio de um estereoscópio. Posteriormente foram tiradas fotos da região soldada com o auxílio de uma câmera digital.

4.4.2 Análise de Raio-X

O ensaio radiográfico é aplicável a qualquer tipo de material sólido para detectar defeitos internos e externos. As radiações são ondas eletromagnéticas, assim como a luz visível. Caracterizam-se por possuírem um comprimento de onda extremamente curto o que lhes dá a capacidade de atravessarem materiais opacos à luz visível. O ensaio tem como princípio a absorção diferenciada de radiação pela peça a ser analisada. A absorção diferenciada ocorre devido a variação de espessura e densidade,

ou seja, devido ao coeficiente de absorção de massa do material da peça (Figura 36) Esta absorção diferenciada é que indicará a existência de alguma descontinuidade no material e poderá ser registrado através de um filme, telas fluorescentes, tubo de imagem, detectores eletrônicos de radiação ou mesmo através de um sistema de radiografia digitalizada. [35]. Os ensaios radiográficos foram realizados no próprio LabSolda.

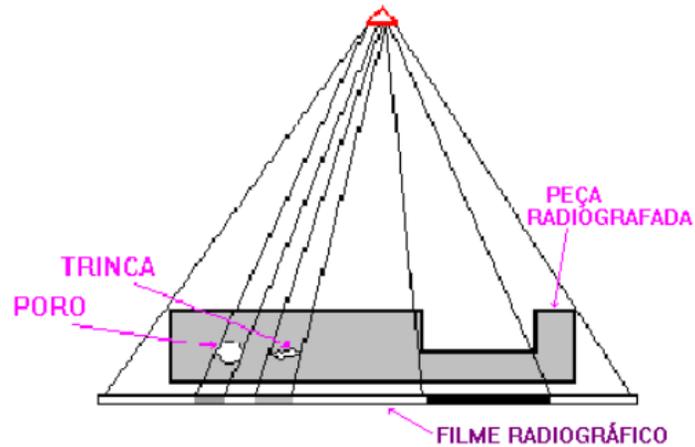


Figura 36 - Ensaio de Raio-X

5 RESULTADOS E DISCUSSÕES

Através da análise e compreensão das curvas, principalmente de corrente e tensão em relação ao tempo, é possível entender os fenômenos físicos e elétricos que estão ocorrendo no arco e na poça de fusão e atuar no sentido de programar essas curvas para a obtenção de resultados específicos desejados.

A análise no equipamento foi necessária a fim de compreender e checar os valores impostos durante a soldagem, correlacionando-os com os valores introduzidos no equipamento. Desta forma, foi analisado o comportamento dos sinais de corrente, tensão e velocidade de arame em relação ao tempo. Os medidores de tensão e corrente foram colocados em cabos estratégicos no cabeçote onde há a passagem de tensão e corrente elétrica, o medidor de arame foi acoplado na saída do alimentador de arame.

Os parâmetros utilizados na fonte de soldagem para avaliação através do SAP, são mostrados na Tabela 2.

Tabela 2 - Parâmetros utilizados para avaliação com SAP

	Figura 37	Figura 38 e 39
Corrente de pulso (A)	180	150
Corrente de base (A)	120	100
Tempo de pulso (s)	0,3	0,3
Tempo de base (s)	0,3	0,3

No processo de soldagem TIG a tensão de soldagem é intrínsecas a distância entre o eletrodo e a peça e a corrente aplicada, é possível observar a variação da tensão de acordo com os pulsos de corrente. Todos os valores procederam conforme configurados

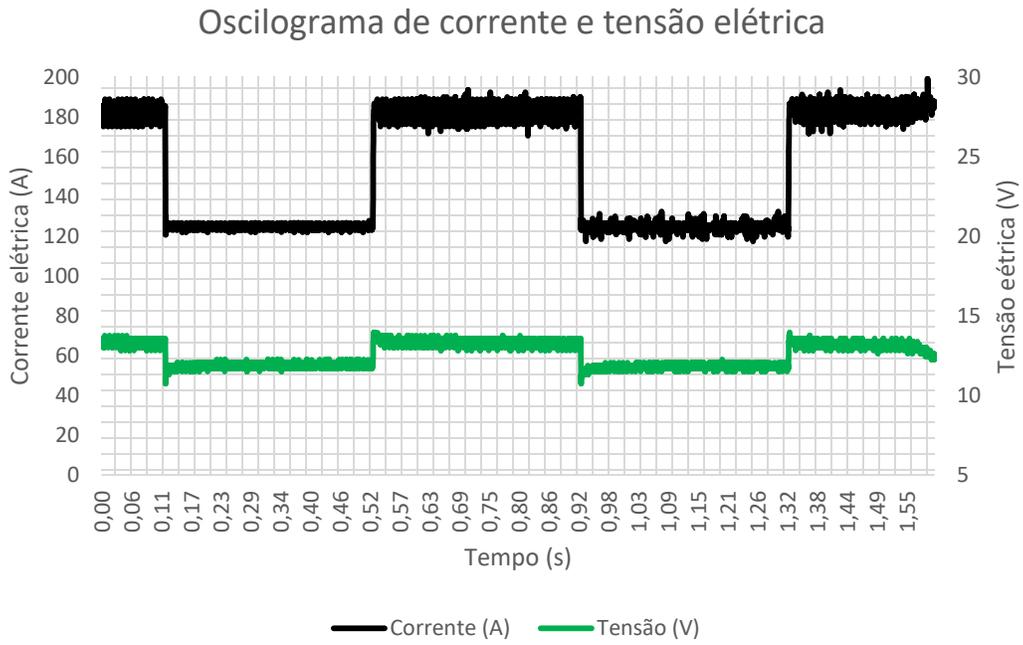


Figura 37 - Oscilograma de corrente e tensão elétrica, primeiro teste

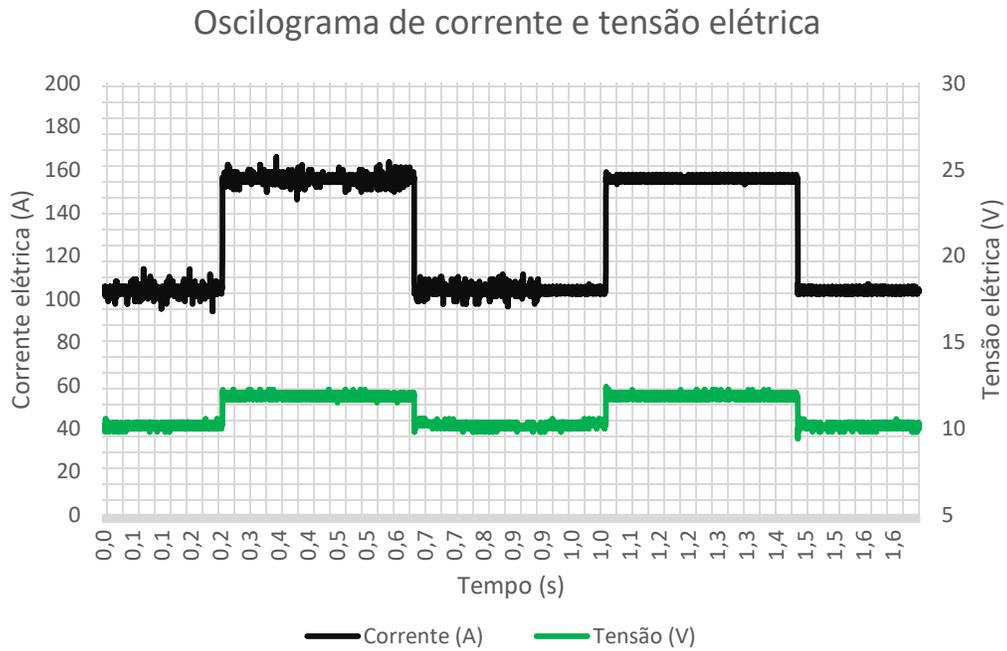


Figura 38 - Oscilograma de corrente e tensão elétrica, segundo teste.

Foi realizado um teste avaliando a tensão e corrente de soldagem ao longo de uma maior seção do cordão de solda, mostrados na Figura 39. É possível observar que as os valores configurados de corrente elétrica, e as rampas de subida e descida se comportaram como programados.

Também na Figura 39, é possível perceber a dinâmica da variação da tensão elétrica do longo do cordão. Antes da abertura do arco elétrico, tem-se valores de tensão em torno de 45 V, que representam a chamada tensão em vazio da fonte, necessária para a abertura do arco elétrico através do modo toque.

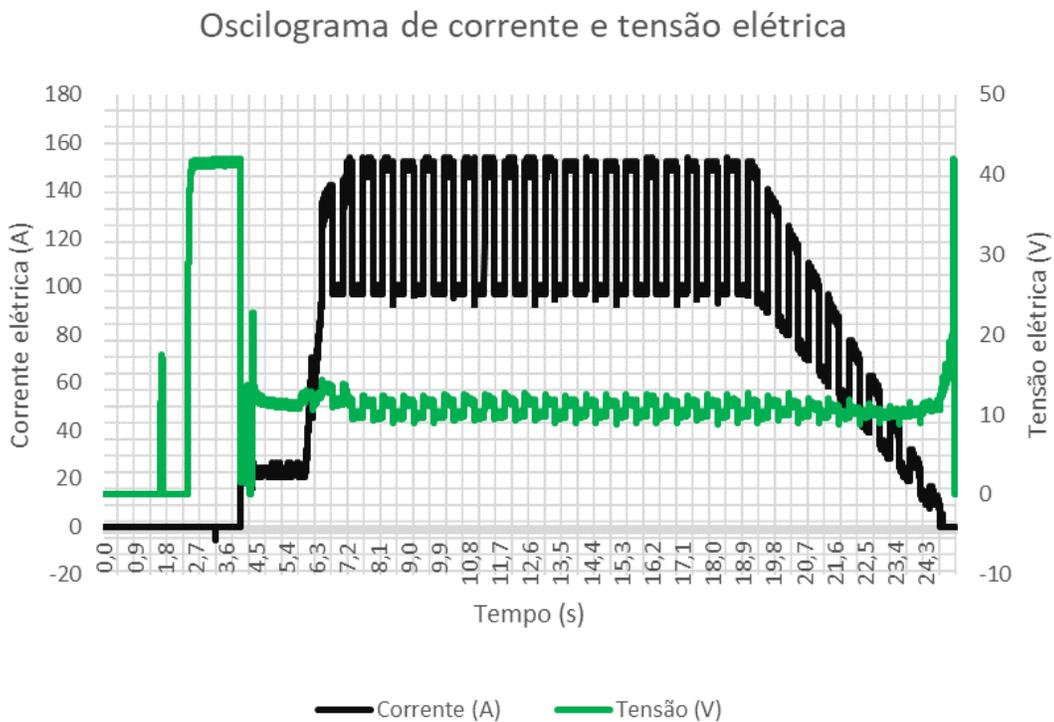


Figura 39 - Tensão e Corrente Elétrica ao longo do cordão de solda

Foram configuradas velocidades de arame de 1,0 m/min e 1,5 m/min e avaliado a velocidade de alimentação de arame em relação a um tempo de aquisição de dados. Há certa variação dos valores obtidos, porém, esta variação pode ocorrer devido à forma de aquisição do sensor do SAP, que se trata de um sensor rotativo mecânico em

que em alguns casos pode haver escorregamento entre o arame e o sensor, de toda forma, os resultados obtidos quanto a alimentação do arame foram satisfatórios.

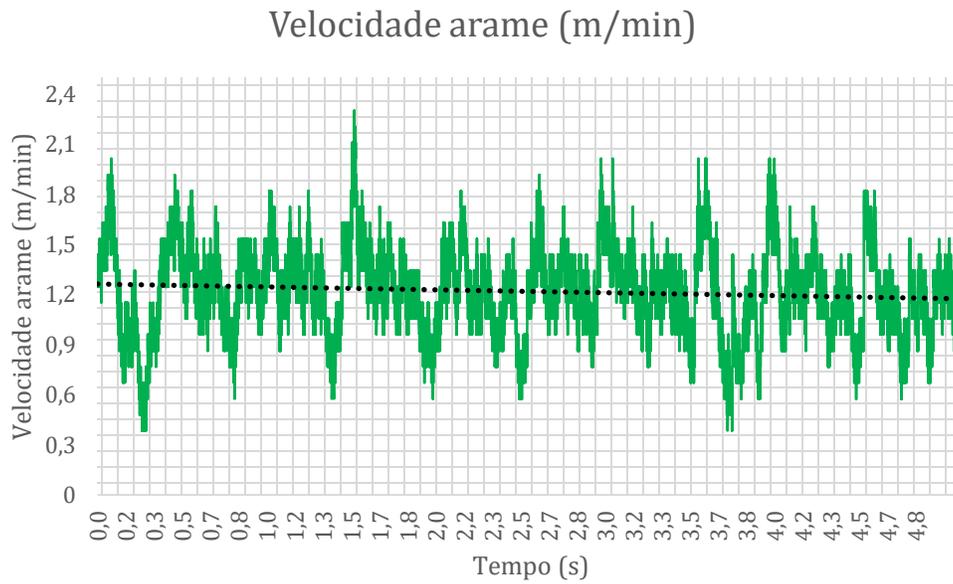


Figura 40 - Velocidade de arame de 1 m/min

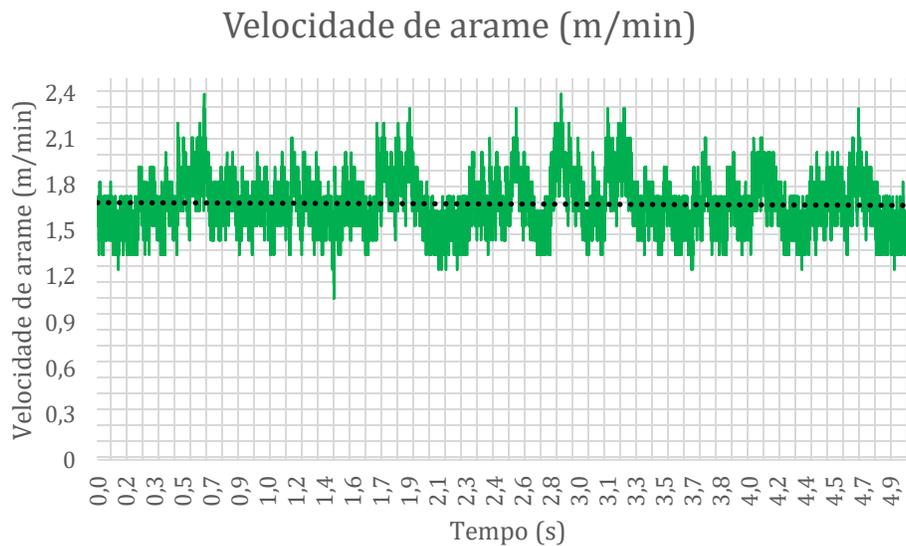


Figura 41 - Velocidade de arame de 1,5 m/min

Dentre os valores configurados e obtidos após a avaliação com o SAP, o equipamento mostrou-se confiável. Todos os valores configurados diretamente na fonte de soldagem e pós avaliação dos dados obtidos através do SAP, apresentaram exatidão e tolerância aceitável, o equipamento não mostrou variações ao longo do cordão de solda.

A proposta inicial era a de realização de um único cordão de solda sob a junta que alcançasse as dimensões requeridas pelo projeto, sabia-se previamente, em partes, da dificuldade de desenvolvimento da soldagem pelo fato de possuir dimensões maiores que as geralmente utilizadas no processo TIG e principalmente pelas limitações impostas pelo sistema de soldagem, por ser dedicado a outra aplicação, e estar sendo adaptado para a aplicação descrita. Visto tal dificuldade considerou-se a hipótese de tecimento da tocha de soldagem e empilhamento dos cordões realizando mais de um cordão de solda na mesma junta, com o propósito de obtenção das dimensões de 9 mm do cordão.

Em todos os ensaios foi utilizado a DEP de 3 mm, sendo mantida constante ao longo dos diferentes cordões de solda controlada pelo AVC. A distância entre o eletrodo e o arame também foi de 3 mm. Todas as variáveis dimensionais em relação a tocha de soldagem são mostradas na Figura 42.

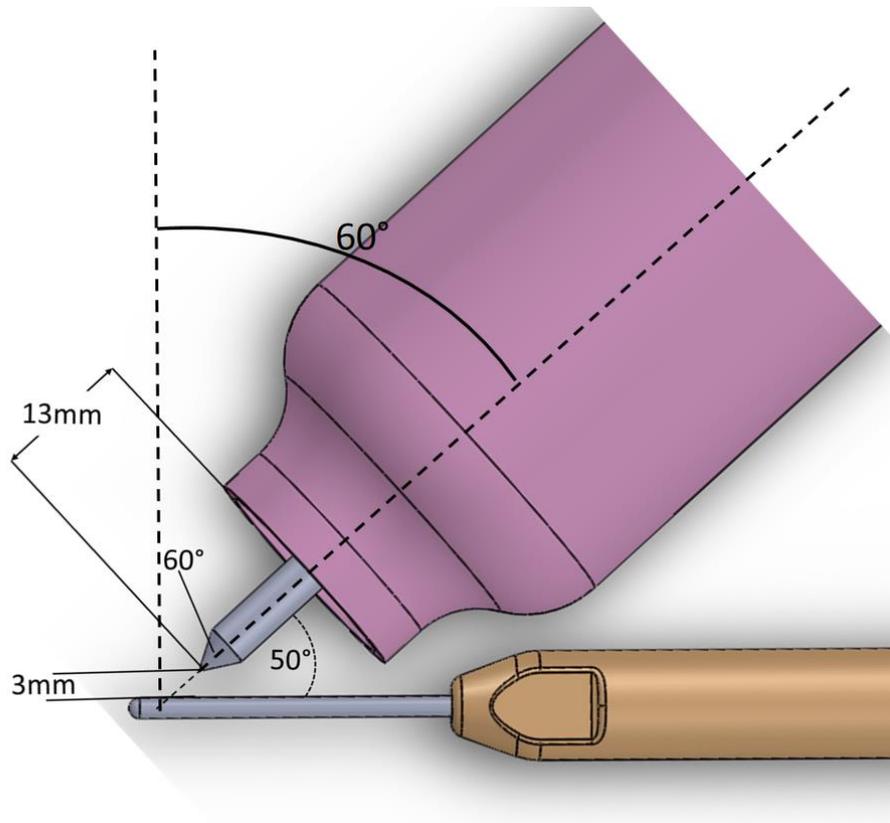


Figura 42 - Distâncias e ângulos utilizados na tocha de soldagem.

5.1 CORPOS DE PROVA DE AÇO CARBONO

A Tabela 03 mostra os dados configurados na fonte de soldagem de acordo com o número de cordões de solda realizados. Entre os testes os parâmetros foram ajustados de forma a promover uma melhor qualidade do cordão de solda, com base nos cordões anteriores.

Tabela 3 - Parâmetros utilizados para soldagem dos corpos de prova aço carbono.

Amostra	Passes	Corrente pulso (A)	Corrente base (A)	Velocidade de soldagem (mm/min)	Velocidade de arame (m/min)	Tempo de base/pulso (s)	Amplitude oscilação (mm)	Tempo de execução oscilação (s)
1	1	130	100	51	-	0,4	-	-
2	1	150	120	51	0,7	0,4	-	-
3	1	150	120	71	1,0	0,4	-	-

4	1	180	150	71	1,0	0,4	-	-
5	1	150	120	71	1,0	0,4	-	-
6	1	150	120	71	0,7	0,4	-	-
7	1	150	120	51	1,0	0,4	-	-
8	1	170	140	51	1,0	0,4	1,5	1
9	1	180	120	51	1,0	0,4	4	2
10	1	180	120	51	1,5	0,4	4	2
11	1	200	120	41	1,5	0,4	4	2
12	1	200	120	31	1,5	0,4	4	2
13	1	150	110	71	0,7	0,4	-	-
	2	180	120	51	1,5	0,4	4	2
14	1	150	110	41	0,7	0,4	-	-
	2	180	120	41	1,5	0,4	4	2
15	1	150	120	41	1,0	0,4	-	-
	2	190	130	41	1,5	0,4	4	2
16	1	150	100	41	1,0	0,4	-	-
	2	150	100	41	1,0	0,4	-	-
	3	150	100	41	1,0	0,4	-	-
18	1	150	110	41	1,0	0,4	-	-
	2	150	90	61	1,0	0,4	-	-
	3	150	90	61	1,0	0,4	-	-

As Figuras 43, 44, 45, 46, 47 e 48 mostradas, representam as melhores soldas obtidas através de cada uma das hipóteses de empilhamento dos cordões de solda. Foram realizadas análises macrográficas nos corpos de prova com o objetivo de avaliar se houve devida fusão no componente que sofreu o processo de soldagem e as dimensões dos cordões de solda.

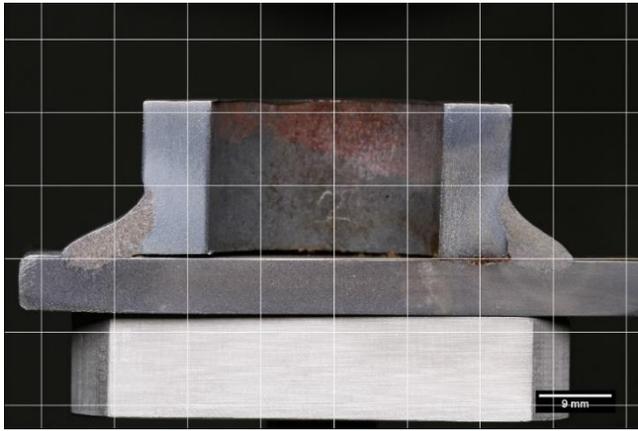


Figura 43 - Amostra 11

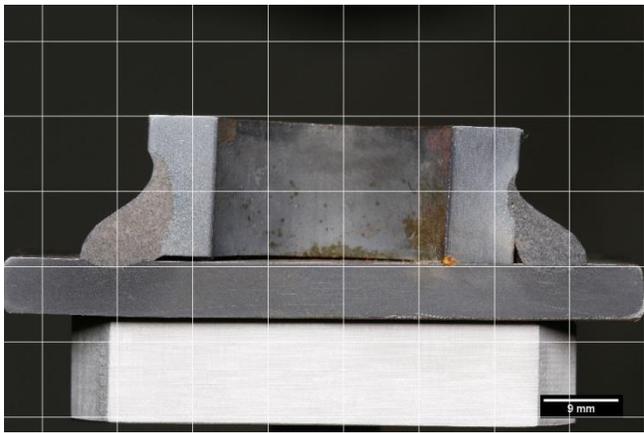


Figura 44 - Amostra 12

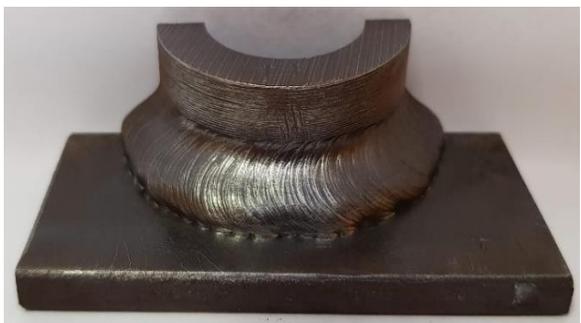
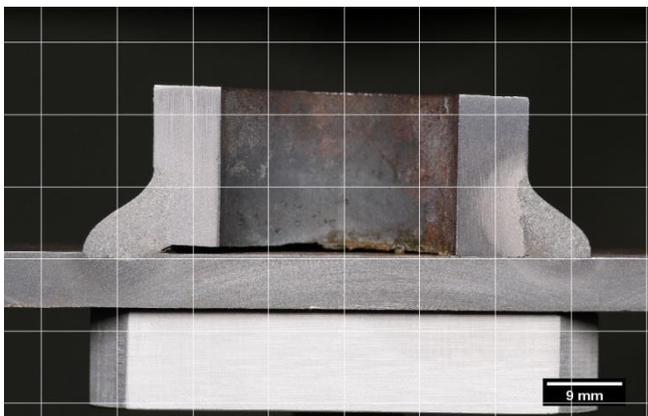


Figura 45 - Amostra 14

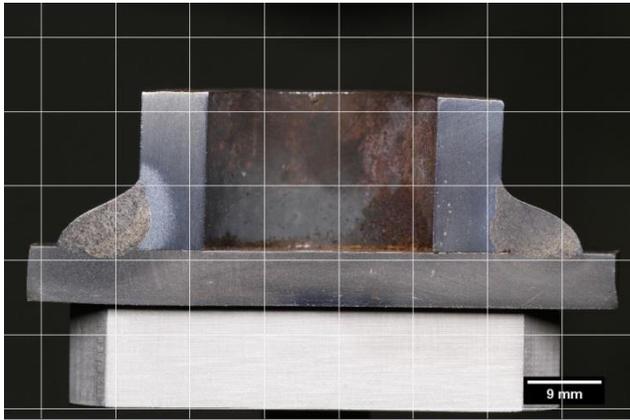


Figura 46 - Amostra 15

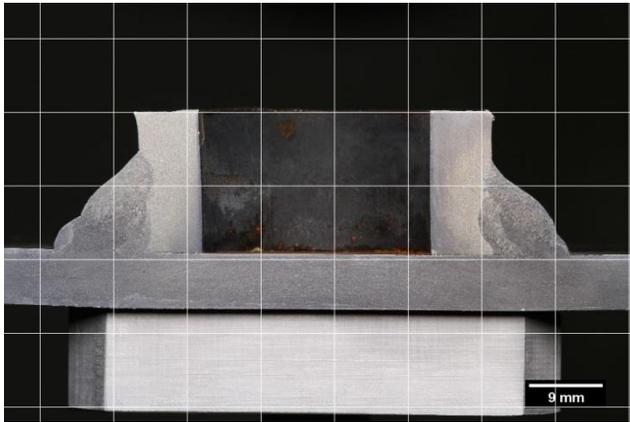


Figura 47 - Amostra 16

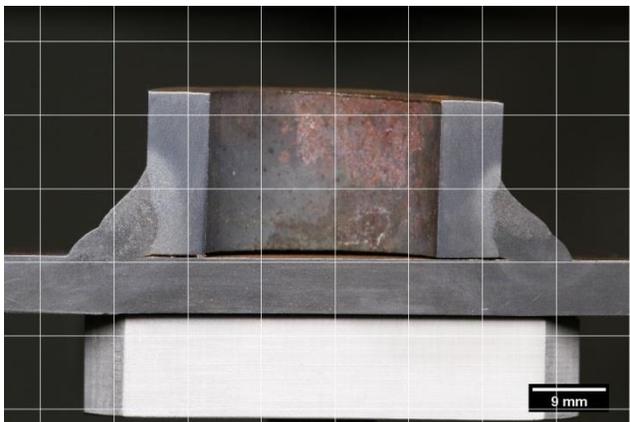
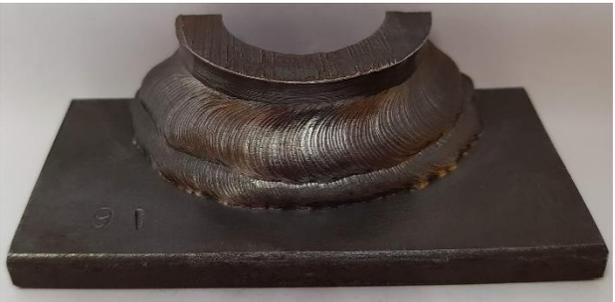


Figura 48 - Amostra 18



Realizando as medidas das dimensões dos cordões de solda, referenciados como lado esquerdo e direito a partir da visualização da foto, obteve-se os valores, apresentados na Tabela 4.

Tabela 4 - Dimensões dos cordões de solda em milímetros (aço carbono)

Amostra	Lado esquerdo		Lado direito	
	Inferior (mm)	Lateral (mm)	Inferior (mm)	Lateral (mm)
11	9,6	8,8	8	8,9
12	8	11,3	8,9	9,2
14	8,3	9,9	7,9	9,8
15	9,7	8,4	10,2	8,6
16	10,3	12,3	9,3	11,3
18	9,5	10,6	8,8	9,6

5.2 CORPOS DE PROVA DE AÇO INOXIDÁVEL 304

A partir do embasamento criado com o suporte das soldas realizadas nos corpos de prova de aço carbono, foram realizadas soldas em aço inoxidável 304, partindo dos parâmetros obtidos nos melhores cordões.

Observou-se dificuldade e ineficiência do tecimento nos corpos de prova em aço, pelo fato do equipamento não possuir um eixo paralelo a junta soldada, resultado em falta de fusão e dificuldade do controle da poça de soldagem. A Figura 49 ilustra a posição atual do eixo de movimentação do tecimento e ilustra o eixo ideal necessário para a movimentação do tecimento. Devido a falta do eixo paralelo a junta, a hipótese do uso de tecimento foi descartada nos corpos de prova fabricados em aço inoxidável.

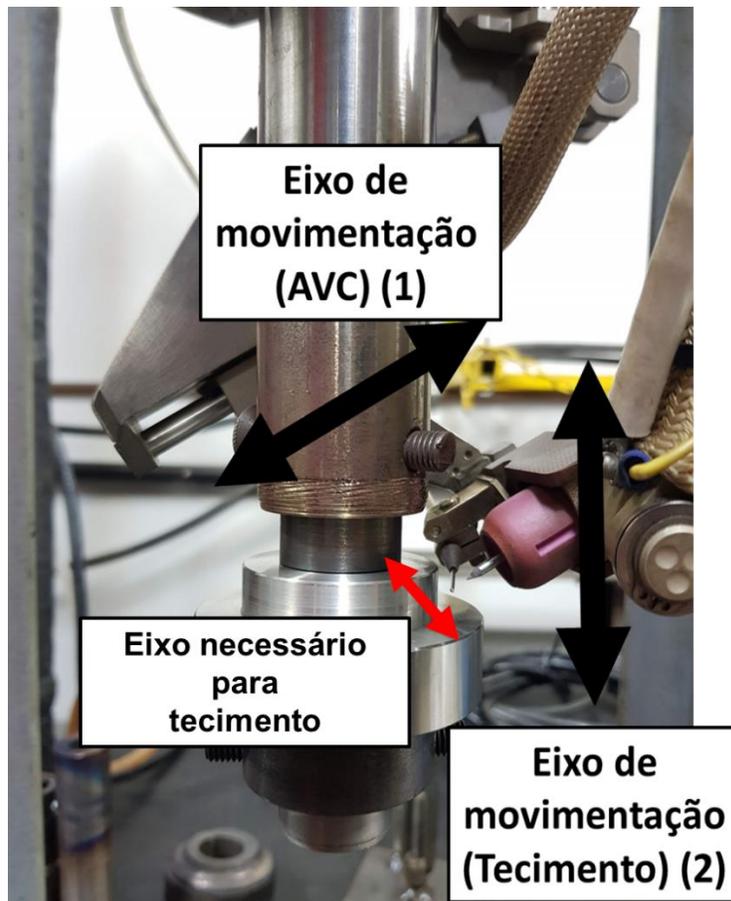


Figura 49 - Atuais eixos de AVC e tecimento e eixo necessário para a realização do tecimento na junta utilizada neste trabalho.

Pensou-se na hipótese de combinação entre o eixo atual de tecimento, que o equipamento possui, com a correção em tempo real através do AVC, porém, o equipamento não se mostrou suficientemente robusto para tal aplicação. O equipamento mostrou atrasos para correção da posição durante o movimento oscilatório da tocha, devido a isso, a hipótese de tecimento em conjunto com AVC foi descartada.

Visto também a dificuldade de atingir as dimensões desejadas com um único passe de soldagem a hipótese de passe único também foi descartada.

Após a avaliação dos resultados obtidos em aço carbono, foi levantada a hipótese de maior controle da poça de fusão, por isso também foram testados e avaliados corpos de prova com 4 passes sobrepostos. Desta forma foram realizados os seguintes ensaios:

1. **Três passes:** elaborar três cordões de solda sobrepostos, sem tecimento.
2. **Quatro passes:** elaborar quatro cordões de solda sobrepostos, sem tecimento.

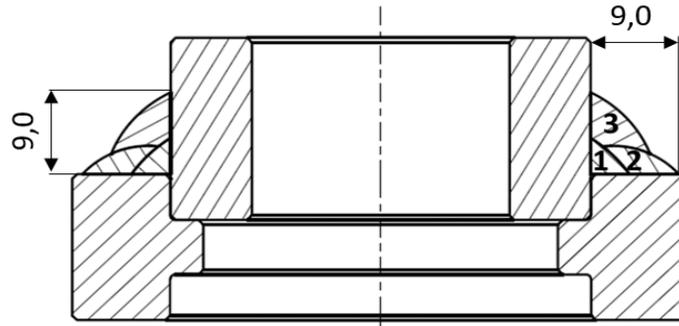


Figura 50 - Três passes

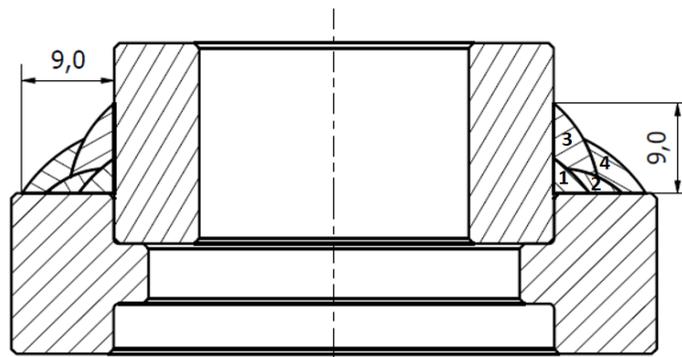


Figura 51 - Quatro passes

A Tabela 05 mostra os dados configurados na fonte de soldagem de acordo com o número de cordões de solda realizados. Entre os testes os parâmetros foram ajustados de forma a promover uma melhor qualidade do cordão de solda, com base nos cordões anteriores. Os parâmetros obtidos em aço carbono serviram de base para os parâmetros iniciais.

Houveram alterações nos parâmetros de velocidade de soldagem em relação aos de aço carbono. Percebeu-se que utilizando baixas velocidades de soldagem, o

componente apresentou aquecimento excessivo, podendo ocorrer problemas de empenamento ou excesso de tensões residuais.

Tabela 5 - Parâmetros utilizados para soldagem dos corpos de prova aço inoxidável.

Amostra	Passes	Corrente pulso (A)	Corrente base (A)	Velocidade de soldagem (mm/min)	Velocidade de arame (m/min)	Tempo de base/pulso (s)
1 i	1	150	90	61	1	0,4
	2	160	120	70	1	0,4
	3					
2 i	1	160	120	100	1	0,3
	2					
	3					
	4					
3 i	1	160	120	100	0,8	0,3
	2					
	3					
	4					

As amostras 2i e 3i, representam as melhores soldas obtidas através de cada uma das hipóteses de empilhamento dos cordões de solda. Foram realizadas análises metalográficas nos corpos de prova com o objetivo de avaliar se houve devida fusão no componente que sofreu o processo de soldagem, as dimensões dos cordões de solda e os defeitos gerados pelo processo através de análise de raio-x.

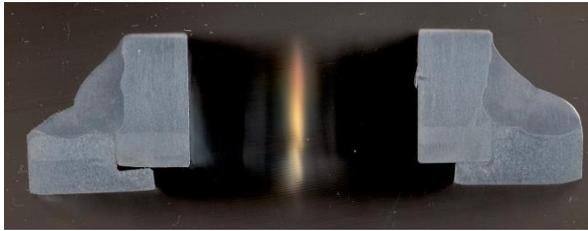


Figura 52 - Amostra 2i



Figura 53 - Amostra 3i

Realizando as medidas das dimensões dos cordões de solda, referenciados como lado esquerdo e direito a partir da visualização da foto, obteve-se os seguintes valores:

Tabela 6 - Dimensões dos cordões de solda (aço inoxidável 304)

Amostra	Lado esquerdo		Lado direito	
	Interior (mm)	Lateral (mm)	Inferior (mm)	Lateral (mm)
2i	9,68	10,3	9,83	9,09
3i	7,9	8,7	7,9	8,22

Procedendo com a avaliação dos corpos de prova fabricados em aço inoxidável, foram efetuados ensaios não destrutivos de raio-X com objetivo de inspeção do componente. Através do ensaio de raio-X é possível identificar defeitos como: falta de fusão do material de base, poros nos cordões de solda, inclusões por partículas de segunda fase e contaminação por tungstênio vindo do eletrodo, por exemplo.

As duas melhores amostras foram submetidas ao ensaio de raio-X (amostras 2i e 3i). Nota-se que houve descentralização de um dos passes de soldagem na amostra (2 i). Na amostra identificada como (3 i) há contaminação de alguma partícula de segunda fase com maior peso atômico que o ferro, provavelmente tungstênio proveniente do eletrodo de soldagem.



Figura 54 - Ensaio de raio-x nas amostras fabricadas em aço inoxidável (2i) e (3i)

De maneira geral, as soldas apresentaram resultados satisfatórios. O modo de empilhamento dos cordões junto a parametrização feita no sistema, foi suficiente para o desenvolvimento de um procedimento de soldagem que atenda as normas especificadas.

6 CONCLUSÃO

Foi visto neste trabalho que o modo de centralização entre o cabeçote de soldagem e o corpo de prova, é essencial para a obtenção de bons cordões de solda, pois em caso de desalinhamentos entre o equipamento e os corpos de prova resultam em cordões desalinhados e fora da região da junta não sendo possível a união de maneira adequada.

Por outro lado, foi possível identificar limitações do equipamento, como a falta de um eixo para realização do tecimento paralelo a posição da junta utilizada. Na configuração atual, como ilustrado anteriormente, o sistema de tecimento só atua em um eixo, sendo necessário a correção do AVC, não sendo possível a obtenção de bons cordões de solda. Devido a tal limitação do equipamento, não foi possível utilizar o método de tecimento de forma adequada.

Devido a problemas no equipamento de soldagem na parte final dos testes, não foi possível realizar mais testes utilizando em corpos de prova fabricados de aço inoxidável. Será necessário uma maior avaliação efetuando combinações entre o eixo de tecimento e a correção do AVC visando estratégias de deposição de material com menor número de passes de soldagem do que os que foram desenvolvidos sem a presença do tecimento, podendo assim efetuar a soldagem de forma mais rápida e eficaz.

As amostras fabricadas em aço carbono com dois passes, sendo o primeiro sem tecimento e o segundo com tecimento e três passes sobrepostos mostraram resultados satisfatórios em relação as dimensões dos cordões de solda obtidos. As amostras com um passe único com apresentaram a dimensão necessária em uma das dimensões, porém teve-se maior dificuldade para controle da poça de fusão além de apresentarem maior percentual de defeitos como falta de fusão e poros.

As amostras onde foram efetuados três passes de solda sem tecimento, alcançaram maior fusão do metal de base, atenderam as dimensões requeridas e houve maior facilidade para controle da poça de fusão e para o processo de deposição do material, devido a isso foram escolhidas base para os testes em aço inoxidável.

Dentre as amostras fabricadas em aço as amostras com quatro passes sobrepostos apresentaram resultados satisfatórios e em uma delas obteve-se a parametrização necessária atendendo a demanda do projeto e podendo ser aplicada em campo. Na configuração atual do equipamento, considerando suas limitações, a estratégia de quatro passes de soldagem foi a que melhor atendeu as dimensões requeridas e o controle térmico na peça, sendo eficaz para aplicação no componente.

Desse modo, com esse trabalho foi possível adquirir conhecimento sobre as necessidades que um sistema de soldagem desse tipo teria como:

- necessidade de centralização com precisão entre os componentes que irão sofrer soldagem e o sistema de soldagem para que não haja desalinhamento da tocha de soldagem durante o processo;
- necessidade de eixo paralelo a junta de soldagem para a realização do tecimento da tocha de soldagem de forma eficaz;
- necessidade do controle da distância do eletrodo peça pelo AVC visando minimizar e corrigir possíveis desalinhamentos de centralização;

Foi possível perceber a influência e importância de cada uma das variáveis de soldagem sobre o processo, que servirá de embasamento para o desenvolvimento futuro do sistema dedicado.

7 REFERÊNCIAS

- [1] P. V. Marques and A. Q. Bracarense, *Soldagem - Fundamentos e Tecnologia*, 3th ed. Belo Horizonte - MG - Brazil: Editora UFMG, 2014.
- [2] “Soldagem automática - Mecânica Industrial,” 2014. .
- [3] R. Dicicino, “Litoral brasileiro: Costa tem grande importância e deve ser preservada,” *UOL Educação*, 2007. [Online]. Available: <https://educacao.uol.com.br/disciplinas/geografia/litoral-brasileiro-costa-tem-grande-importancia-e-deve-ser-preserveda.htm>. [Accessed: 08-Jun-2018].
- [4] K. C. Riffel, “Avanços Tecnológicos no processo TIG: Técnicas inovadoras de alimentação de arame e procedimentos automatizados como contribuição para a união de tubos internamente cladeados.,” Universidade Federal de Santa Catarina - UFSC, 2018.
- [5] I. O. Pigozzo, “Soldagem TIG Orbital: Otimização de equipamentos e prospecções tecnológicas para procedimentos de passe raíz.,” Universidade Federal de Santa Catarina - UFSC, 2015.
- [6] E. Alejandro, G. Olivares, V. Manuel, and V. Díaz, “Estudo do Processo TIG Hot-Wire com Material de Adição AISI-316L Analisando o Efeito do Sopro Magnético do Arco sobre a Diluição do Cordão de Solda,” vol. 21, no. 3, pp. 330–341, 2016.
- [7] R. G. N. Silva, “Caracterização do processo de soldagem TIG com alimentação de arame dinâmica em alta frequência,” Univerisade Federal de Santa Catarina - UFSC, 2016.
- [8] J. R. da Cruz and A. Scotti, “Materiais para eletrodos que emitem termionicamente em soldagem a arco,” *Soldag. Inspeção*, vol. 18, no. 4, pp. 370–379, 2013.
- [9] D. N. Noble, *ASM Handbook - Welding, Brazing and Soldering*, 10th ed. Ohio, 1993.
- [10] E. R. V. Garcia, “Efeito da Corrente de Soldagem do Processo TIG pulsado autógeno na microestrutura da zona fundida dos aços inoxidáveis Duplex UNS S32304 e UNS S32101,” Universidade de São Paulo - USP, 2011.
- [11] J. WANG, S - H.; CHIU, P - K.; YANG, J-R.; FANG, “Gamma (γ) phase transformation in pulsed GTAW weld metal of duplex stainless steel,” *Mater. Sci. Eng. A*, vol. 420, pp. 26–33, 2006.
- [12] M. B. Schwedersky, J. C. Dutra, M. P. . Okuyama, and R. H. G. Silva, “Soldagem TIG de elevada produtividade: influência dos gases de proteção na velocidade limite para a formação de defeitos,” *SciELO*, vol. Vol. 16, 2011.
- [13] A. SPILLE-KOHOFF, “Arc welding: From process simulation to structural mechanics. Part I: Process simulation with ANSYS CFX,” *CFX Berlin Softw. GmbH, EASC*, no. Munich, Germany, 2009.
- [14] A. A. SHIRALI and C. MILLS, “The effect of welding parameters on penetration in GTA welds,” *Weld. Res. Suppl.*, pp. 347–353, 1993.
- [15] J. E. V. AURES, “Avaliação de processos MIG/MAG derivativos utilizando-se simulador de soldagem de dutos por retificação,” Universidade de Brasília, 2013.
- [16] A. TOKAR, “Efeito dos parâmetros de pulsação no processo TIG sobre a formação da poça de fusão.,” Universidade Federal de Uberlândia, 2011.
- [17] D. W. FIGUERÔA, I. O. PIGOZZO, R. H. G. SILVA, T. F. A. SANTOS, and S. L. URTIGA FILHO, “Influência da posição e dos parâmetros de soldagem na soldagem TIG orbital aplicada a tubulações de aço baixo carbono.,” *Soldag. Inspeção*, vol. 20, pp. 446–455, 2015.

- [18] S. I. SHIPILOV, A.V.; EROFEEV, V.A.; POLOSKOV, “Determination of the optimum conditions of melting of filler wire in automatic orbital welding of steel pipes,” *Weld. Int.*, vol. 27, pp. 397–402, 2013.
- [19] L. E. dos S. Paes, “Soldagem TIG Orbital - Técnica de alimentação dinâmica do arame visando aumento na produtividade,” Universidade Federal de Santa Catarina - UFSC, 2017.
- [20] J. Lukkari, “Orbital TIG - A Great Way to Join Pipes,” *ESAB Weld. Cut. J.*, vol. 60, pp. 3–6, 2006.
- [21] P. Sagues, “Adaptive control techniques advance automatic welding,” *Weld. J.*, vol. 88, pp. 26–28.
- [22] A. M. Farias, “Análise Microestrutural de Juntas de Aço Inoxidável UNS S32750 Soldadas pelos Processos Automáticos MIG/MAG e TIG Orbital com Diferentes Aportes Térmicos e sua Influência na Resistência à Corrosão,” Rio de Janeiro - Brazil, 2013.
- [23] R. TEDESCHI, P. A. L. SIGNORELLI and M. D. M. NEVES, “Comparação da Junta Soldada pelo Processo GTAW dos Aços Inoxidáveis AISI 316L e Superduplex UNS S32750 para Trocadores de Calor Usados em Refinarias de Petróleo.,” in *XXXVI CONSOLDA – Congresso Nacional de Soldagem*, 2010.
- [24] American Welding Society, “Standard Welding Terms and Definitions,” *AWS 3.0*, vol. 12, p. 148, 2009.
- [25] FAQ, “What is narrow gap welding?,” *TWI Global*, 2018. .
- [26] K. . Lo, C. Shek, and J. K. L. Lai, “Recent developments in stainless steels,” *Mater. Sci. Eng. R*, vol. 65, pp. 39–104, 2009.
- [27] E. C. de Miranda, C. C. Silva, M. F. Motta, H. C. de Miranda, and J. P. Farias, “Avaliação do Uso do Tecimento sobre o Nivel de Diluição e Geometria do Cordão de Solda na Soldagem TIG com Alimentação Automática de Arame Frio,” *Soldag. Inspeção*, vol. 20, pp. 180–190, 2015.
- [28] H. . Solomon, “Fundamentals of Weld Solidification,” in *ASM Handbook - Welding, Brazing and Soldering*, 10th ed., Ohio: ASM - American Society for Metals, 1993, pp. 45–54.
- [29] W. Emílio, S. . Brandi, and F. D. . Mello, *Soldagem - Processos e Metalurgia*. Edgar Blucher, 1995.
- [30] S. . David and J. . Vitek, “Correlations between welding parameters and weld microstructures,” *Int. Mater. Rev.*, vol. 34, pp. 213–245, 1989.
- [31] K. Graf, “Estabilidade a Alta Temperatura de Revestimentos de Hastelloy C depositados por PTA,” Universidade Federal do Paraná, 2004.
- [32] S. Kou, *Welding Metallurgy*. 2002.
- [33] G. J. Davies and J. G. Garland, “Solidification structures and properties,” in *International Metallurgical Reviews*, 20th ed., 1975, pp. 83–105.
- [34] A. Machines, “Operation Manual - Model 227 Power Supply,” *Pacoima, California - USA*, 2015. .
- [35] Cleide Maria Marqueze, “Procedimento de Inspeção Radiográfica - LabSolda - UFSC,” Florianópolis, 2018.