



**INSTITUTO
FEDERAL**
Pernambuco

INSTITUTO FEDERAL DE EDUCAÇÃO, CIÊNCIA E TECNOLOGIA DE
PERNAMBUCO – *CAMPUS* CARUARU
DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA MECÂNICA

VITOR FELLIPE MACÊDO DE ARAÚJO

**CARACTERIZAÇÃO MICROESTRUTURAL DE UMA JUNTA SOLDADA DE
BAIXO TEOR DE CARBONO OBTIDA ATRAVÉS DO PROCESSO MIG E TENDO
COMO PARÂMETRO VARIÁVEL O FLUXO E PRESSÃO DO GÁS**

Caruaru – PE

2021

VITOR FELLIPE MACÊDO DE ARAÚJO

**CARACTERIZAÇÃO MICROESTRUTURAL DE UMA JUNTA SOLDADA DE
BAIXO TEOR DE CARBONO OBTIDA ATRAVÉS DO PROCESSO MIG E TENDO
COMO PARÂMETRO VARIÁVEL O FLUXO E PRESSÃO DO GÁS**

Trabalho de Conclusão de Curso apresentado ao curso de Engenharia Mecânica do Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia *Campus* Caruaru, em cumprimento às exigências para obtenção do grau de Bacharel em Engenharia Mecânica.

Orientador: Prof. Dr. Diniz Ramos de Lima Júnior

Caruaru – PE

2021

A663c

Araújo, Vitor Fellipe Macêdo de

Caracterização microestrutural de uma junta soldada de baixo teor de carbono obtida através do processo MIG e tendo como parâmetro variável o fluxo e pressão do gás/ Vitor Fellipe Macêdo de Araújo; orientação de Diniz Ramos de Lima Júnior. – Caruaru, 2021.

80 f.

Trabalho de Conclusão de Curso – (Graduação em Engenharia Mecânica) Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia de Pernambuco, Departamento de Engenharia Mecânica, Curso de Engenharia Mecânica, 2021.

1. Soldagem. 2. Tecnologia da soldagem. 3. Soldagem por arco elétrico com gás de proteção. 4. Soldagem MIG (*Metal Inert Gas*). 5. Engenharia Mecânica - IFPE. I. Lima Júnior, Diniz Ramos de. II. Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia de Pernambuco. III. Trabalho de Conclusão de Curso. IV. Título.

CDD: 620.1

CDU: 621.7

Dedico este trabalho a minha mãe, Gilvânia Macêdo, e ao meu pai, Amaro Neto, por todo o amor, esforço e suporte.

AGRADECIMENTOS

Primeiramente agradeço a Deus pela oportunidade que concede em minha vida e de me permitir ir em busca de meus sonhos.

Aos meus pais, Amaro Neto e Gilvânia Macêdo, por todo o esforço em suas vidas para me incentivar e garantir a realização de mais um sonho, por muitas vezes abdicando de suas necessidades para priorizar tal feito.

Agradeço a minha companheira e amiga, Gabriela Reis, por compartilhar comigo toda sua força e dedicar apoio nos momentos mais difíceis na realização deste sonho.

Ao meu orientador, Diniz Ramos, por compartilhar comigo toda o seu conhecimento e experiência, sempre à disposição e sem medir esforços para a realização de mais este trabalho e da melhor forma possível.

Aos meus amigos que a universidade me apresentou, por todas as experiências vividas e alegrias compartilhadas durante essa longa jornada.

RESUMO

A realidade da indústria moderna é de constante busca por melhores processos que garantam o atendimento das demandas crescentes, sempre alinhando qualidade e produtividade, como um ciclo sem fim em busca da melhoria contínua. Na indústria metalmeccânica, o processo de soldagem torna-se crucial e de grande influência no produto. Trata-se de um processo de união entre metais e é realizado a partir de uma combinação de diversos parâmetros. Dentre os tipos de soldagem, a soldagem MIG (*Metal Inert Gas*) é uma das mais encontradas no meio industrial devido sua versatilidade, baixo custo e produtividade. Para tal, utiliza-se de gás inerte na proteção da região a ser unida, criando uma barreira contra possíveis contaminantes que influenciam negativamente na qualidade da solda. A correta seleção dos gases e do seu fluxo de alimentação darão a garantia de um processo com o mínimo de discontinuidades. Diante disto, este trabalho tem como objetivo estudar a influência do fluxo de gás de proteção na soldagem MIG de caixas de aço de baixo teor de carbono para baterias industriais em uma indústria no interior de Pernambuco. Para tal, realizou-se a comparação dos processos variando-se o fluxo de gás e comparando-os a partir da caracterização microestrutural e ensaios de dureza. Os resultados mostraram que a utilização de altos valores de fluxo de gás, não apenas não fornecem mais proteção, mas tornam-se prejudiciais ao processo, atuando de forma inversa ao esperado. Além disto, uma correta seleção com a redução do fluxo de gás confere, além de mais qualidade, a redução no consumo de material e, conseqüentemente, menos custos para o processo.

Palavras-chave: MIG. Fluxo de gás. Caracterização microestrutural.

ABSTRACT

The reality of modern industry is one of constant search for the best processes that guarantee the fulfillment of growing demands, always aligning quality and productivity, as an endless cycle in search of continuous improvement. In the metalworking industry, the welding process becomes crucial and has a great influence on the product. It is a process of joining metals and is carried out from a combination of several parameters. Among the types of welding, the MIG (Metal Inert Gas) welding is one of the most commonly found in the industrial environment due to its versatility, low cost and productivity. For this, inert gas is used to protect the region to be joined, creating a barrier against possible contaminants that negatively influence the quality of the weld. The correct selection of gases and their supply flow will guarantee a process with a minimum of discontinuities. Therefore, this work aims to study the influence of shielding gas flow on MIG welding of low carbon steel boxes for industrial batteries in an industry in the interior of Pernambuco (Brazil). To this end, a comparison of the processes was carried out by varying the gas flow and comparing them from the microstructural characterization and hardness tests. The necessary results are that the use of high gas flow values, not only does not provide more protection, but they become detrimental to the process, acting in an opposite way to what was expected. In addition, a correct selection with the reduction of gas flow conferred, in addition to better quality, a reduction in material consumption and, consequently, lower costs for the process.

Keywords: MIG. Gas flow. Microstructural characterization.

LISTA DE ILUSTRAÇÕES

Figura 1 - Esquema dos diversos tipos de soldagem	15
Figura 2 - Processo de formação de arco elétrico	16
Figura 3 - Esquemática de processo de soldagem com eletrodo revestido	17
Figura 4 - Princípios de soldagem a arco com proteção gasosa	18
Figura 5 - Processo de solda TIG	19
Figura 6 - Processo de solda MIG/MAG	20
Figura 7 - Equipamento de soldagem MIG/MAG	21
Figura 8 - Controle do comprimento do arco	22
Figura 9 - Relação entre tensão do arco e corrente de soldagem.....	23
Figura 10 - Etapas de modo de transferência por curto-circuito.....	25
Figura 11 - Corrente crítica de transição para aerossol	26
Figura 12 - Diferenças de penetração em função do gás de proteção.....	29
Figura 13 - Porosidade em solda MIG.....	33
Figura 14 - Tipos de porosidade: (a) distribuída, (b) agrupada e (c) alinhada	33
Figura 15 - Trinca centralizada formada em aço SAE 1045	34
Figura 16 - Classificação das trincas de acordo com sua localização: (1) em cratera, (2) transversal na ZF, (3) transversal na ZTA, (4) longitudinal na ZF, (5) na margem da solda, (6) sob o cordão, (7) na linha de fusão e (8) na raiz da solda.	35
Figura 17 - Exemplos de falta de penetração.....	36
Figura 18 - Esquemática da inclusão de escória	36
Figura 19 – Efeito da intensidade da corrente na geometria de solda	38
Figura 20 – Penetração de solda em função da corrente de soldagem Ar-25%CO ₂	39
Figura 21 - Efeito da velocidade de avanço na geometria de solda.....	40
Figura 22 - Distância entre o bico de contato e a peça	40
Figura 23 - Efeito do <i>stick-out</i> na corrente de soldagem	41
Figura 24 - Geometria de chapa de aço para confecção da junta soldada	45
Figura 25 - Montagem para fabricação das juntas soldadas	45
Figura 26 - Display do alimentador de arame	46
Figura 27 - Junta soldada AC1	49
Figura 28 - Junta soldada AC1 após jateamento abrasivo	49
Figura 29 - Junta soldada AC2	50
Figura 30 - Junta soldada AC2 após jateamento abrasivo	51

Figura 31 - Junta soldada AP1	52
Figura 32 - Junta soldada AP1 após jateamento abrasivo	52
Figura 33 - Junta soldada AC3	53
Figura 34 - Junta soldada AC3 após jateamento abrasivo	54
Figura 35 - Junta soldada AC4	55
Figura 36 - Junta soldada AC4 após jateamento abrasivo	55
Figura 37 - Junta soldada AP2.....	56
Figura 38 - Junta soldada AP2 após jateamento abrasivo	57
Figura 39 - Metal de Base 200x AC1	58
Figura 40 - ZF 200x AC1	58
Figura 41 - ZTA 200x AC1	59
Figura 42 - Metal de Base 200x AC2	60
Figura 43 - ZF 200x AC2	60
Figura 44 - ZTA 200x AC2	61
Figura 45 - Metal de Base 200x AP1.....	62
Figura 46 - ZF 200x AP1	62
Figura 47 - ZTA 200x AP1.....	63
Figura 48 - Inclusão de escória na AP1	63
Figura 49 - Metal de Base 200x AC3	64
Figura 50 - ZF 200x AC3	65
Figura 51 - ZTA 200x AC3	65
Figura 52 - Metal de Base 200x AC4	66
Figura 53 - ZF 200x AC4	67
Figura 54 - ZTA 200x AC4	67
Figura 55 - Metal de Base 200x AP2.....	68
Figura 56 - ZF 200x AP2.....	69
Figura 57 - ZTA 200x AP2.....	69
Figura 58 - Caixa de aço soldada com vazão de 30 l/min	71
Figura 59 - Caixa de aço soldada com vazão de 15 l/min antes e após jateamento	72

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 - Corrente de transição em função do gás, material e diâmetro de arame	26
Tabela 2 - Seleção de gases de proteção para soldagem MIG/MAG em aerossol	30
Tabela 3 - Especificações AWS para soldagem MIG/MAG	31
Tabela 4 - Composição química para arames de aços doces e baixa liga.....	32
Tabela 5 - Vazão dos gases de proteção em função do material do arame e corrente..	37
Tabela 6 - Diâmetro de bocal em função da vazão de gás selecionada.....	38
Tabela 7 - Composição química do aço ASTM A36.....	43
Tabela 8 - Composição do arame AWS A5.18-17 ASME SFA5.18 / 2019 ER70S-6.	44
Tabela 9 - Propriedades mecânicas do arame AWS A5.18-17 ASME SFA5.18 / 2019 ER70S-6	44
Tabela 10 - Parâmetros de soldagem	46
Tabela 11 - Resumo das microestruturas encontradas.....	70

LISTA DE SÍMBOLOS

A	Ampere
CC	Corrente contínua
D	Diâmetro
Lc	Corrente críticas de transição
$V_{crítica}$	Máxima velocidade de escoamento
μ	Viscosidade do fluido
ρ	Densidade do fluido
C	Carbono
Si	Silício
Mn	Manganês
P	Fósforo
S	Enxofre
Al	Alumínio
Cu	Cobre
Ni	Níquel
Cr	Cromo
Mo	Molibdênio
N	Nitrogênio
Sn	Estanho
Co	Cobalto
Zr	Zircônio
Sb	Antimônio
Ca	Cálcio
V	Vanádio
J	Joule

LISTA DE SIGLAS E ABREVIATURAS

ASTM	American Society for Testing and Materials
ABNT	Associação Brasileira de Normas Técnicas
NBR	Norma Brasileira Regulamentadora
SAE	Society of Automobile Engineers
MIG	Metal Inert Gas
MAG	Metal Active Gas
TIG	Tungsten Inert Gas
AWS	American Welding Society
GMAW	Gas Metal Arc Welding
ASME	American Society of Mechanical Engineers
ZF	Zona Fundida
ZTA	Zona Termicamente Afetada
MB	Metal Base

SUMÁRIO

1 INTRODUÇÃO	12
1.1 OBJETIVOS	13
1.1.1 Objetivo Geral	13
1.1.2 Objetivos Específicos	13
2 FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA.....	14
2.1 DEFINIÇÃO DE SOLDAGEM	14
2.2 PROCESSOS DE SOLDAGEM A ARCO ELÉTRICO	15
2.2.1 Soldagem com eletrodo revestido.....	16
2.2.2 Processo de soldagem com proteção gasosa.....	18
2.3 PROCESSO DE SOLDAGEM MIG.....	20
2.3.1 Princípios de funcionamento e equipamento	21
2.3.2 Modos de transferência do metal	24
2.3.2.1 Transferência globular	24
2.3.2.2 Transferência por curto-circuito	24
2.3.2.3 Transferência por spray (aerossol).....	25
2.3.3 Gases de proteção	27
2.3.3.1 Propriedades dos gases	27
2.3.3.2 Misturas gasosas	28
2.3.4 Arame eletrodo	30
2.4 DEFEITOS DE SOLDAGEM.....	32
2.4.1 Porosidade.....	32
2.4.2 Trincas	34
2.4.3 Falta de penetração	35
2.4.4 Distorção.....	36
2.4.5 Inclusão de escória.....	36
2.5 INFLUÊNCIA DO FLUXO DE GÁS.....	37

2.6 INFLUÊNCIA DA CORRENTE	38
2.7 INFLUÊNCIA DA VELOCIDADE DE AVANÇO	39
2.8 EXTENSÃO DO ELETRODO (<i>STICK-OUT</i>)	40
2.9 MICROESTRUTURA DO CORDÃO DE SOLDA	41
3 METODOLOGIA.....	43
3.1 MATERIAIS.....	43
3.2 MÉTODOS	44
3.2.1 Preparação das juntas soldadas	44
3.2.2 Procedimento de soldagem	45
3.2.3 Caracterização metalográfica.....	46
3.2.4 Análise Macrográfica e Micrográfica	47
4 RESULTADOS E DISCUSSÕES	48
4.1 Macrografia.....	48
4.1.1 Junta Soldada Confeccionada com Vazão de Gás de 15 l/min e Utilização do Programa 12.....	48
4.1.2 Junta Soldada Confeccionada com Vazão de Gás de 12 l/min e Utilização do Programa 12.....	50
4.1.3 Junta Soldada Confeccionada com Vazão de Gás de 30 l/min e Utilização do Programa 12.....	51
4.1.4 Junta Soldada Confeccionada com Vazão de Gás de 15 l/min e Utilização do Programa 11.....	53
4.1.5 Junta Soldada Confeccionada com Vazão de Gás de 12 l/min e Utilização do Programa 11.....	54
4.1.6 Junta Soldada Confeccionada com Vazão de Gás de 30 l/min e Utilização do Programa 11.....	56
4.2 Micrografia	57
4.2.1 Junta Soldada Confeccionada com Vazão de Gás de 15 l/min e Utilização do Programa 12.....	57

4.2.2 Junta Soldada Confeccionada com Vazão de Gás de 12 l/min e Utilização do Programa 12.....	59
4.2.3 Junta Soldada Confeccionada com Vazão de Gás de 30 l/min e Utilização do Programa 12.....	61
4.2.4 Junta Soldada Confeccionada com Vazão de Gás de 15 l/min e Utilização do Programa 11.....	64
4.2.5 Junta Soldada Confeccionada com Vazão de Gás de 12 l/min e Utilização do Programa 11.....	66
4.2.6 Junta Soldada Confeccionada com Vazão de Gás de 30 l/min e Utilização do Programa 11.....	68
4.3 Confeção de Caixas de Aço	70
4.3.1 Confeção de Caixa Aço com vazão de gás de 30 l/min	70
4.3.2 Confeção de Caixa Aço com vazão de gás de 15 l/min	71
5 CONCLUSÃO	73
REFERÊNCIAS	74

1 INTRODUÇÃO

A indústria moderna, em todos os seus setores produtivos, está exigindo equipamentos e componentes mecânicos cada vez mais sofisticados; daí a necessidade de conhecer-se, com razoável profundidade, os materiais empregados no seu projeto e construção, sobretudo metálicos, os quais constituem ainda a principal fonte de suprimento da matéria-prima necessária (CHIAVERINI, 1986).

Sabe-se que na indústria metalmeccânica é constante a busca por melhor qualidade do produto e competitividade, ancoradas no binômio produtividade e redução de custos. Dentre os diferentes processos de fabricação utilizados para a união de materiais metálicos e não metálicos nesta indústria, a soldagem é atualmente o processo mais empregado para a união permanente destes materiais (FILHO, 2012).

Devido à necessidade de um aumento na produtividade é que os processos de soldagem utilizando gases inertes ganharam força nas últimas décadas, uma vez que são capazes de fornecer elevadas densidades de correntes fornecidas pelas fontes modernas e, devido a automatização do processo, foram pioneiros na possibilidade de se conectar um computador em uma máquina de solda, sendo capazes de acompanhar as variáveis obtendo respostas mais rápidas e eficientes (FILHO, 2007).

Na soldagem ao arco elétrico com gás de proteção (GMAW), também conhecida como MIG, temos um arco elétrico estabelecido entre a peça e um consumível na forma de arame, o qual funde o arame à medida que ele é alimentado. O que diferencia este tipo de soldagem das demais, é a proteção oferecida ao processo, o qual um fluxo de gás é lançado pelo sistema expulsando o ar atmosférico da região de soldagem. O gás de proteção utilizado no processo MIG afeta não somente as propriedades da solda, mas determina o formato do cordão de solda. Dependendo do tipo de transferência metálica, o gás de proteção interage com maior ou menor intensidade com o arame eletrodo, podendo alterar as propriedades mecânicas e principalmente a qualidade do cordão solda.

A execução correta do processo de soldagem mediante a seleção de métodos e materiais adequados resultam em uma solda de boa qualidade, a qual sempre estará aliada a produtividade e segurança seja qual for a finalidade do produto ou estrutura. Conforme explica Fardin (2009), a realização de soldas inadequadas durante a fabricação de certos tipos de estruturas ou equipamentos pode resultar em sérios acidentes com grandes perdas materiais e, eventualmente, humanas e danos ao meio ambiente.

Este trabalho trata em específico da influência dos gases de proteção no processo de solda MIG, de acordo com os diversos parâmetros aceitáveis possíveis relacionando-os com o resultado esperado do processo. Para tal, aplicaremos os estudos em uma indústria metalomecânica localizada no interior de Pernambuco, fabricante de caixas de aço para utilização em baterias industriais tracionárias, a qual vem tendo sua produtividade afetada por anomalias e retrabalhos resultantes do processo de soldagem.

1.1 OBJETIVOS

1.1.1 Objetivo Geral

O presente trabalho tem por objetivo realizar a caracterização microestrutural de uma junta soldada com baixo teor de carbono, a qual será obtida através do processo MIG e variação do fluxo e pressão do gás de proteção. Para tanto, será utilizado como material de estudo o aço carbono de baixa liga utilizado por uma indústria metalmeccânica de fabricação de caixas de aço, a fim de identificar a condição ótima de trabalho mediante a definição correta de alimentação dos gases de proteção e demais parâmetros de soldagem para o aço ASTM A36 com diferentes espessuras e geometrias de trabalho utilizando-se de experimentação.

1.1.2 Objetivos Específicos

Como objetivos específicos, este trabalho pretende:

- a) Analisar a influência do fluxo de gás de proteção na melhoria da qualidade do processo de soldagem de acordo com os parâmetros estudados;
- b) Compartilhar o conhecimento sobre a influência do fluxo de gás de proteção na soldagem MIG utilizada em aços ASTM A36;
- c) Realizar o estudo e definição dos parâmetros adequados para a maior eficiência e produtividade do processo.

2 FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA

2.1 DEFINIÇÃO DE SOLDAGEM

Dos diferentes tipos de união de materiais, podemos descrever aquele que se destaca pela sua eficiência e qualidade ao que é aplicado: a soldagem. Este processo está presente também na fabricação, reparo e recuperação de peças e estruturas. Ele abrange desde pequenos componentes da eletrônica até as maiores estruturas já conhecidas e concebidas.

Segundo Lima Junior (2013), a soldagem se destaca dentro todos os processos de união por garantir rapidez, segurança e economia em seu processo, sendo este o mais utilizado industrialmente.

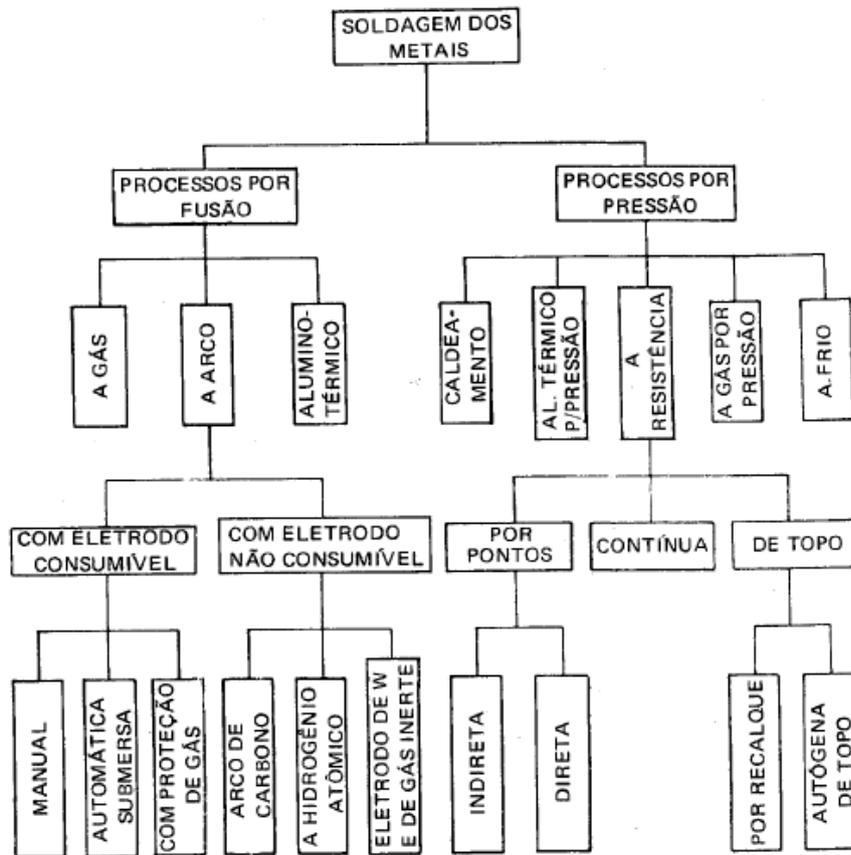
Basicamente, o processo de soldagem realiza a união quase que imediata de materiais metálicos através da aplicação de uma fonte de calor que, ao serem colocadas em contato íntimo, tem sua região específica aquecida e levada ao estado de fusão. Conforme descrito por Chiaverini (1986), a ação de aproximação e aquecimento, plasticidade ou fusão parcial destes materiais leva a um fenômeno de difusão na zona soldada. Como resultado, temos a junta soldada a qual se caracteriza por sua resistência que, após o resfriamento do metal trabalhado, torna-se perfeitamente coesa.

Dentre os tantos processos e aplicações de soldagem existentes, eles podem ser classificados em dois grandes grupos: soldagem por fusão ou soldagem por pressão. Estas classificações são definidas a partir da fonte de energia empregada e do processo físico envolvido. Assim, podemos defini-los como:

- a) **Soldagem por fusão:** as partes são fundidas por meio de energia elétrica ou química, gerando uma fonte concentrada de calor na área de solda levando à fusão do metal. Neste, não há aplicação de pressão, devendo-se adicionar metal de enchimento na junta;
- b) **Soldagem por pressão:** menos utilizado que a soldagem por fusão, neste processo as partes são coalescidas e forçadas umas contra as outras mediante pressão extensa, sendo aquecidas até alcançar o estado plástico.

A Figura 1 apresenta uma esquematização dos principais tipos de soldagem pelas duas classificações conceituadas.

Figura 1 - Esquema dos diversos tipos de soldagem



Fonte: Chiaverini (1986)

O desenvolvimento e aperfeiçoamento dos processos de soldagem são alcançados com a interação de três áreas: projeto de equipamentos soldados, desenvolvimento e aperfeiçoamento dos equipamentos de soldagem, bem como dos materiais, visando obter boa soldabilidade. Realmente, pouco adianta desenvolver um novo material sem que ele possibilite alcançar boa soldabilidade. Por isso, os processos de soldagem estão em contínua evolução (WAINER, 1992).

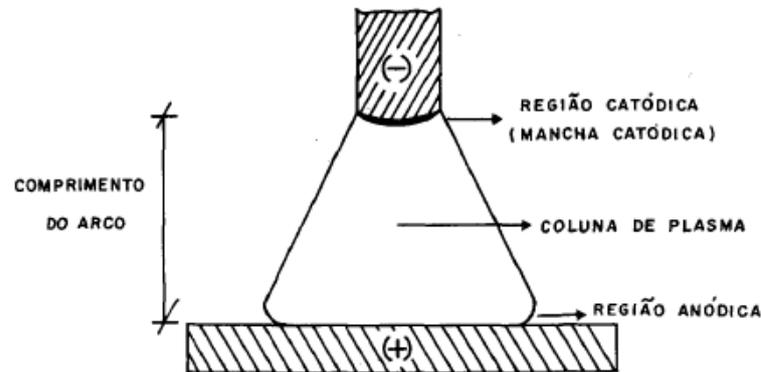
Dentre os processos de soldagem apresentados no esquema, o processo a arco elétrico merece destaque devido a sua utilização nos diversos segmentos da indústria.

2.2 PROCESSOS DE SOLDAGEM A ARCO ELÉTRICO

O processo de soldagem a arco elétrico engloba todos aqueles realizados mediante a aplicação de calor com o calor de um arco elétrico mantido entre a extremidade de um

eletrodo e a peça de trabalho. É também conhecida como solda autógena, onde o material base participa por fusão na constituição da solda.

Figura 2 - Processo de formação de arco elétrico



Fonte: Wainer (1992)

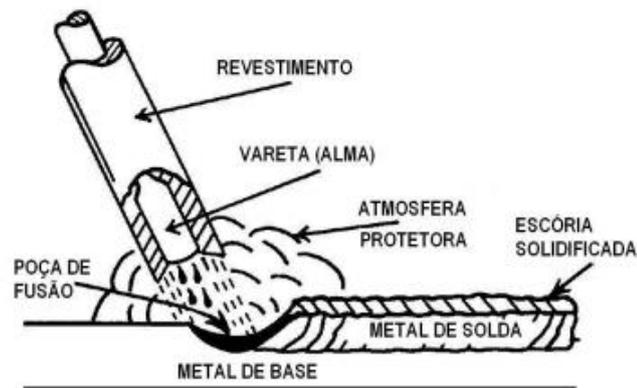
A Figura 2 esquematiza como o processo ocorre onde o arco elétrico é formado a partir de um eletrodo sob ação de corrente elétrica, o qual corresponde ao polo negativo (cátodo) e o metal de base correspondente ao polo positivo (ânodo). O arco promove uma chama que se alarga em direção a peça base, onde formará a poça de fusão. Esses processos formam a região catódica, a coluna de plasma e a região anódica.

Conforme explica Wainer (1992), a soldagem a arco elétrico, sendo o meio mais empregado no mundo da soldagem, engloba diversos tipos os quais são classificados de acordo com o eletrodo ao qual é empregado. Assim, podemos dividir este processo em: processos com eletrodo consumível (eletrodo revestido, MIG/MAG e arco-submerso) e processos com eletrodo não-consumível (TIG).

2.2.1 Soldagem com eletrodo revestido

A solda a arco elétrico com eletrodo revestido é a mais empregada atualmente. Trata-se de um processo gerado a partir de uma fonte de energia elétrica, onde um arco é formado entre um eletrodo consumível, mais especificamente um arame de mesmo material da base, e o metal que desejamos soldar. Este eletrodo é coberto com um revestimento que se funde ao mesmo e ambos, após ação do arco elétrico, transformam-se em gotas direcionadas à poça de fusão. Após o processo de fusão, o revestimento transforma-se em escória que protegerá a região de contaminação proveniente da atmosfera. A Figura 3 esquematiza o processo.

Figura 3 - Esquemática de processo de soldagem com eletrodo revestido



Fonte: Fortes (2005)

Fortes (2005) aponta alguns objetivos principais para a utilização do revestimento:

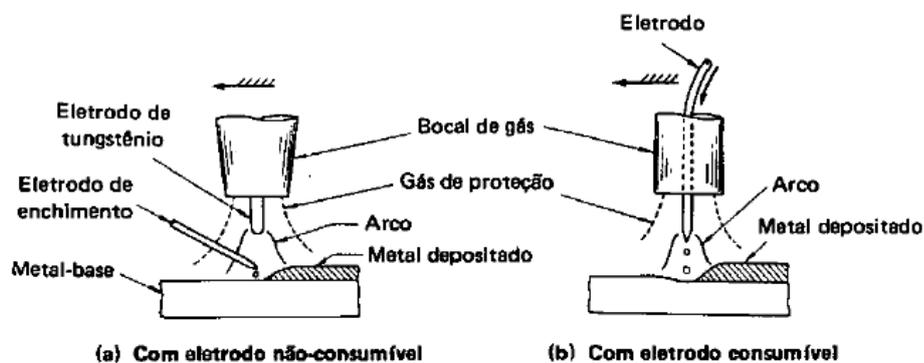
- a) **Proteção do metal de solda:** é a função mais importante do revestimento, o qual protege o metal de solda da atmosfera circundante contendo nitrogênio e oxigênio, garantindo que o metal de solda tenha integridade, resistência e ductilidade necessária, além de livrá-lo de bolhas de gás indesejáveis;
- b) **Estabilização do arco:** manter a transferência das gotas de forma estável, garantindo facilidade na abertura de arco e regularidade a baixas correntes;
- c) **Adição de elementos de liga ao metal depositado:** quando necessário, a composição do elemento pode sofrer adição de alguns elementos balanceado qualquer perda ocorrida na vareta.

Um outro ponto importante a ser observado são as vantagens de se utilizar o eletrodo revestido no processo de soldagem. Trata-se do processo de soldagem mais simples e flexível disponível, podendo ser empregado em todas as posições possíveis de soldagem, além de necessitar apenas de uma fonte de energia, dois cabos elétricos e um eletrodo. Como desvantagem, sabe-se que este processo possui uma taxa de deposição baixa em comparação aos demais processos, além de uma necessidade maior de treinamento entre os soldadores atuantes.

2.2.2 Processo de soldagem com proteção gasosa

No processo de soldagem a arco elétrico com proteção gasosa, a região de solda é protegida através de um gás distribuído pela tocha de solda, evitando contaminação oriunda do fator atmosférico. A partir da Figura 4 podemos entender melhor o sistema. Diferentes gases podem ser utilizados de acordo com a necessidade do processo, dos quais os principais são o hélio, o argônio e o CO_2 . Podem ser empregados processos com eletrodos consumíveis (MIG/MAG) ou eletrodos não consumíveis (TIG).

Figura 4 - Princípios de soldagem a arco com proteção gasosa



Fonte: Okumura (1982)

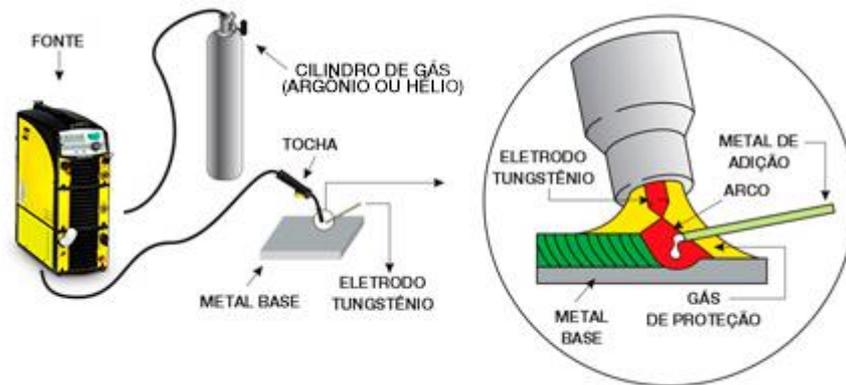
No processo de soldagem TIG (*Tungsten Inert Gas*), temos um eletrodo não consumível de tungstênio, com a proteção da região de solda feita por um gás inerte. Aqui, a solda pode ser feita com ou sem metal de adição. Temos uma solda considerada de boa qualidade, onde é mais utilizada na soldagem de ligas de alumínio, titânio e aços inoxidáveis. Pela sua segurança em qualidade de processo, ela é largamente utilizada em situações em que a integridade da solda é de extrema importância, como em indústrias nucleares e aeronáutica (OKUMURA, 1982).

O esquema ilustrado na Figura 5 mostra um processo de solda TIG sendo aplicado com uso de metal de adição. Como desvantagens do processo, podemos citar a baixa taxa de deposição e a dificuldade de se trabalhar em ambientes abertos com presença de ventos dificultando a ação da proteção gasosa.

Lima Júnior (2013) explica que a utilização do processo TIG é mais predominante na soldagem de metais não ferrosos e aços inoxidáveis, no passe de raiz e na soldagem de peças

finas. Isto se dá pela sua baixa eficiência em comparação aos demais tipos de processo de soldagem.

Figura 5 - Processo de solda TIG



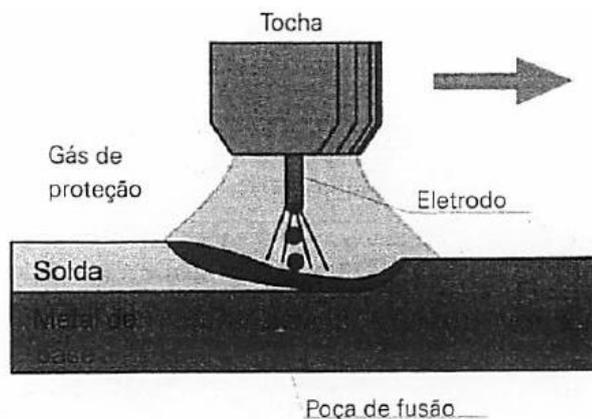
Fonte: Fortes (2005)

No processo GMAW (*Gas Metal Arc Welding*), temos a utilização de gases de proteção em sua aplicação. Ele subdivide-se em processo MIG (*Metal Inert Gas*), onde há utilização de um gás inerte na proteção da poça de fusão, e MAG (*Metal Active Gas*), método onde se utiliza um gás ativo para proteção da região de solda, também chamado de soldagem a arco com CO_2 .

Conforme explica Fortes (2005), o conceito de GMAW surgiu inicialmente com a utilização de gás inerte na soldagem do alumínio, a isto se deve o frequente uso do termo MIG, que ainda é referência no processo. Posteriormente foram surgindo variações, sendo o processo empregado em uma maior diversidade de materiais e utilizando gases de proteção reativos (MAG), passando assim a denominar-se processo GMAW, termo mais abrangente.

A Figura 6 traz uma ilustração deste processo com proteção gasosa. Mais adiante, trataremos deste processo em específico.

Figura 6 - Processo de solda MIG/MAG



Fonte: Modenesi (2009)

2.3 PROCESSO DE SOLDAGEM MIG

Processo bastante versátil e de alta eficiência, a soldagem MIG é hoje amplamente utilizada na indústria, sendo adequada à soldagem de aços-carbono, aços de baixa, média e alta liga, aços inoxidáveis, alumínio e outros.

Neste processo, temos o arame sendo alimentado continuamente pela tocha e um arco elétrico sendo gerado entre o arame e a peça a soldar. Paralelamente, temos um fluxo de gás de proteção sendo aplicado na região de soldagem. A Figura 6 esquematiza o processo. Como o próprio nome diz, trata-se de um gás inerte, geralmente argônio, hélio ou uma mistura de ambos. Segundo Okumura (1982), na utilização do argônio geralmente acrescenta-se de 2 a 5% de O_2 para a soldagem de alumínio ou de 5 a 20% de CO_2 para a soldagem dependendo da utilização e sempre com o objetivo de estabilização do arco elétrico.

Conforme explica Machado (1996), a mistura entre os gases é preferível diante da necessidade de unir as vantagens de utilização dos gases inertes, com melhores características metalúrgicas, e gases ativos como o CO_2 puro, com maior vantagem econômica. Os gases de proteção possuem influência determinante nas características do arco, tipo de transferência de metal, na velocidade, na penetração e na geometria do cordão desejado. Assim, é importantíssimo uma definição prévia correta da composição da mistura, a qual se dá pela predominância das características do gás no processo.

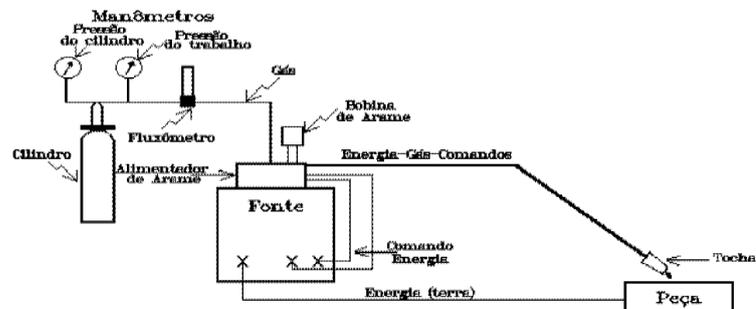
Okumura (1982) elenca as principais características do processo MIG:

- a) Arco estável com boa concentração, provocando o mínimo de respingos e uma operação suave e fácil;
- b) Corrente de soldagem de alta densidade, permitindo uma maior velocidade de deposição, tornando o processo bastante eficiente;
- c) Não há formação de escória;
- d) Junta soldada resultante com melhores características mecânicas em comparação aos demais processos;
- e) Pela predominância do gás inerte, temos um custo operacional mais alto que o processo MAG equivalente;

2.3.1 Princípios de funcionamento e equipamento

Atualmente o processo MIG é mais empregado a partir do sistema semiautomático, no qual o arame é alimentado automaticamente em velocidades igualmente constantes e a tocha operada manualmente. A Figura 7 esquematiza o processo em que é geralmente utilizado uma fonte de soldagem CC e polaridade reversa.

Figura 7 - Equipamento de soldagem MIG/MAG



Fonte: Machado (1996)

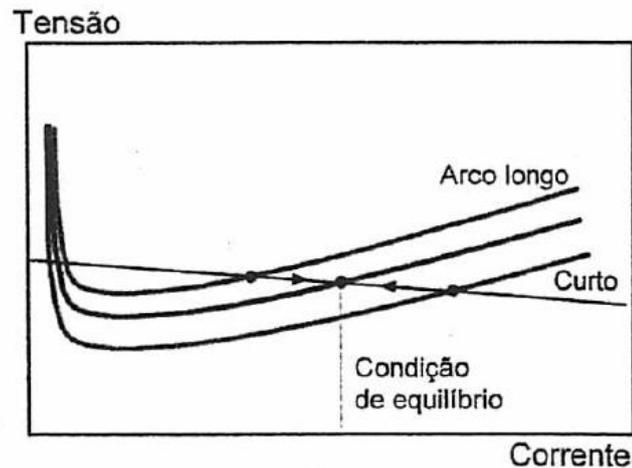
Na soldagem MIG geralmente é utilizada a corrente contínua com eletrodo positivo. O processo com eletrodo negativo pode ocorrer, porém com menor penetração e maior dificuldade de estabilidade do arco.

Considerando que o comprimento do arco deve se manter constante durante a operação, parte da fonte CC a responsabilidade de realizar a rápida correção da corrente constante. Em outras palavras, a qualquer ocorrência de variação brusca de velocidade de alimentação do arame ou uma variação da tensão do arco, a fonte CC rapidamente aumenta ou

diminui a corrente e, conseqüentemente, a taxa de fusão do arame, restaurando o comprimento original do arco. A velocidade de alimentação do arame pode ser selecionada antes da soldagem e ela determinará a corrente de soldagem (MODENESI, 2009).

A autocorreção do comprimento do arco é importantíssima para o correto funcionamento do sistema e crucial para a estabilidade do processo. A Figura 8 esquematiza como variações no comprimento do arco, que estão sempre acompanhadas de variações na tensão, causam grandes variações na corrente de soldagem. Esta variação pode também influenciar diretamente no modo de transferência do metal desejado.

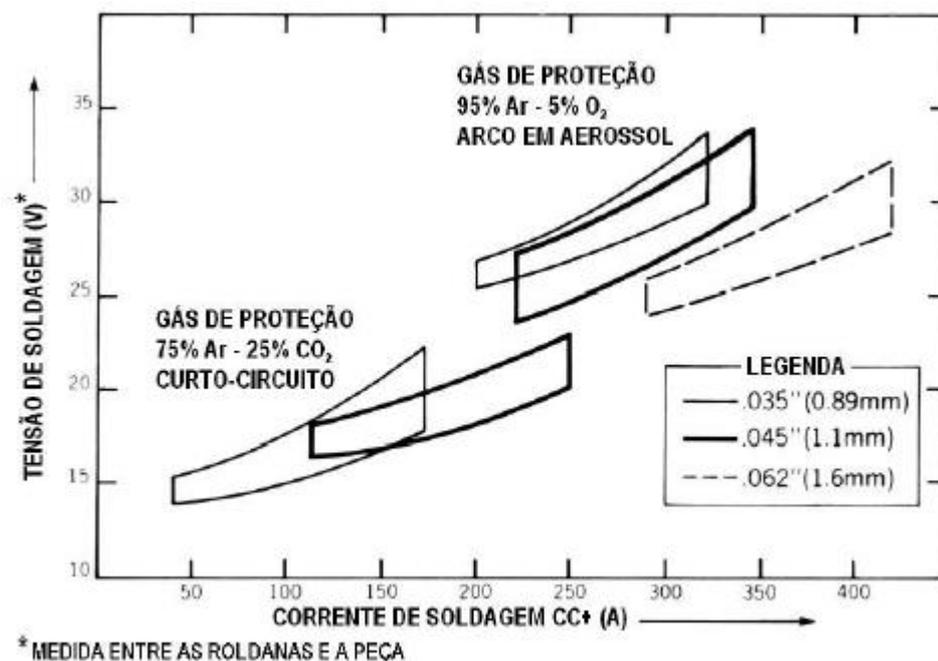
Figura 8 - Controle do comprimento do arco



Fonte: Modenesi (2009)

Quando a corrente e taxa de fusão forem aumentadas, a tensão deverá seguir este aumento mantendo a estabilidade. A Figura 9 ilustra esta relação da tensão e corrente de soldagem para diferentes diâmetros de arame e gases de proteção.

Figura 9 - Relação entre tensão do arco e corrente de soldagem



Fonte: Fortes (2005)

Machado (1996) destaca a importância do bom funcionamento do alimentador de arame, garantindo que o arame seja suprido de forma constante, pois de nada vale um processo em condições ótimas de ajuste sem uma alimentação correta de arame. Ele enfatiza a importância do sistema de alimentação de arame no equilíbrio necessário para o sistema visto que há uma relação linear entre a velocidade de avanço e a corrente requerida. O controlador não apenas mantém a velocidade de ajuste, ele também regula o início e fim da alimentação a partir do acionamento do gatilho da tocha pelo operador.

Para Modenesi (2009), a manutenção correta da taxa de alimentação de arame tem sido um grande problema no processo de soldagem principalmente nos processos MIG, onde variações na distância entre a tocha e o alimentador e até variações no diâmetro do arame e do furo no bico de contato causam uma resistência à passagem do arame. Consequentemente, esta resistência resultará em alterações na velocidade de alimentação e em uma solda irregular. Como agravantes, ainda podemos citar a variação de tensão de rede e desgastes de equipamentos como o bico de contato e impurezas acumuladas no interior do conduíte.

Como apresentado na Figura 8, o controlador é responsável também pelo envio do gás de proteção, a água de refrigeração e a fonte de soldagem para a tocha através de um sistema de uso de válvulas solenoides. Assim, o controlador determina a sequência do fluxo de gás, a energização do contato da fonte e o pré-fluxo e pós-fluxo de gás.

2.3.2 Modos de transferência do metal

Três são os tipos de transferência metálica, os quais são influenciados diretamente pelas definições e parâmetros de soldagem: globular, por curto-circuito e por spray (aerossol). Os fatores que mais influenciam no modo de transferência do metal são: magnitude da corrente de soldagem, tensão do arco, diâmetro e composição do arame, o gás de proteção utilizado no processo e as características da fonte.

2.3.2.1 Transferência globular

O modo de transferência globular ocorre na faixa de transição entre a de curto-circuito e a spray, quando se aumenta a corrente e tensão para valores acima do recomendado para a transferência em curto-circuito. Ela é caracterizada principalmente pelo diâmetro elevado da gota (maior que a do arame) que se separa do arame devido ao aumento de seu peso e, pela ação da gravidade, viaja através do arco para depois tocar na poça de fusão, superaquecendo-se e desintegrando-se. Esta ação resulta em um nível de respingos relativamente elevado, porém ainda inferior ao modo de curto-circuito.

2.3.2.2 Transferência por curto-circuito

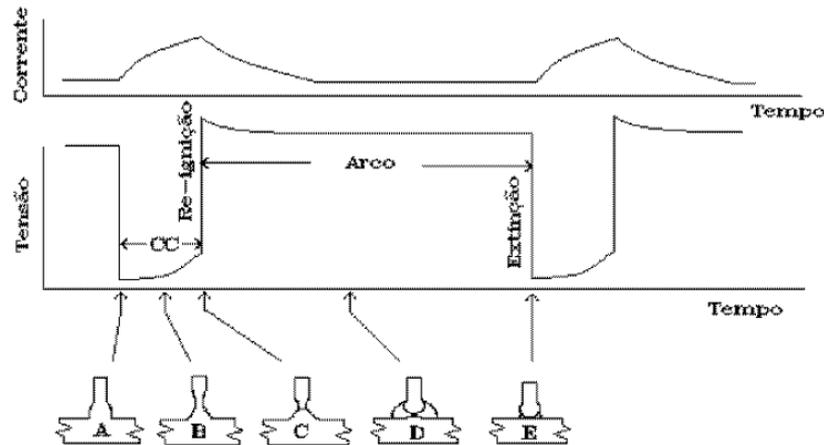
A transferência por curto-circuito ocorre basicamente na soldagem a pequenos comprimentos de arco, baixas correntes de soldagem (abaixo dos valores para a globular) e com utilização de arame de 0,8 a 1,2 mm.

Conforme explica Fortes (2005), o metal só é transferido do arame para a poça de fusão quando há contato entre os dois ou a cada curto-circuito, o que ocorre de 20 a 200 vezes por segundo. Quando o arame toca a poça de fusão, a corrente eleva-se a um valor alto o suficiente para atingir o curto-circuito, aquecendo o arame e promover a transferência do metal. Mesmo com o aumento de corrente, ela ainda não é suficiente para evitar os respingos gerados pela separação violenta da gota de metal, caracterizando, assim, este tipo de transferência como o de mais elevado nível de respingos.

As diferentes etapas de transferência por curto-circuito são representadas na Figura 10, sendo: (A) início do curto-circuito, (B) formação de “pescoço” entre o eletrodo e a peça, (C)

momento do curto-circuito e transferência do metal para a poça, (D) fase do arco e (E) o reinício do ciclo.

Figura 10 - Etapas de modo de transferência por curto-circuito



Fonte: Machado (1996)

Machado (1996) enfatiza que se a taxa de aumento da corrente no ato do curto-circuito for excessiva, a separação da gota se dará de forma explosiva devido a elevada densidade de corrente na constrição que se forma e, conseqüentemente, produz-se um volume inaceitável de salpicos, que pode ser evitado introduzindo indutância variável no circuito.

2.3.2.3 Transferência por spray (aerossol)

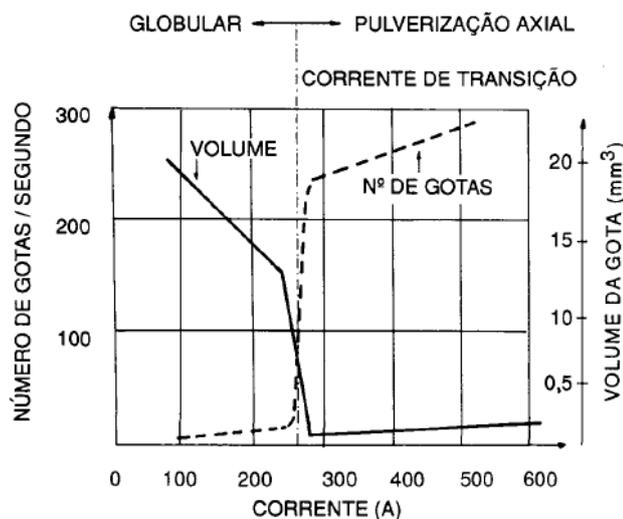
Também conhecido como transferência por névoa, este tipo de transferência é o mais predominante na soldagem MIG. Ao definirmos valores de corrente e tensão mais elevados que os demais tipos de transferência, esta torna-se na prática um verdadeiro arco em spray.

Na transferência por spray nós temos um afilamento da ponta do eletrodo ocasionada por um núcleo bastante concentrado. Esta interação resulta em gotículas do metal bem pequenas, menores que o diâmetro do arame, que se desprendem do eletrodo em grande velocidade. Na MIG, este fenômeno só se processará quando tivermos fonte de corrente contínua e, portanto, polaridade inversa.

Segundo Wainer (1992), um fator importante para este processo é a corrente de soldagem que, ao atingirmos um valor pré-determinado, o fenômeno passa a acontecer no regime de transferência por spray. A esta corrente mínima à qual o fenômeno ocorre chamamos de corrente de transição e esta é influenciada diretamente por três parâmetros: o

diâmetro do arame, o material do arame e o gás de proteção. A Figura 11 ilustra o efeito da corrente de transição sobre as gotas metálicas para diâmetro do arame de 1,6mm e gás de proteção argônio com 1% de O_2 . Nela, podemos observar a alteração brusca na frequência e volume das gotas metálicas à cerca de 260A de corrente.

Figura 11 - Corrente crítica de transição para aerossol



Fonte: Wainer (1992)

Pela Figura 11 entendemos como a transferência do metal se comporta a níveis de corrente e tensão intermediários mantendo-se no tipo globular até que sejam elevadas ao ponto de atingir a corrente crítica para que a transição para aerossol (ilustrada como pulverização axial) ocorra.

Machado (1996) define, a partir da Tabela 1, equações que relacionam a corrente crítica de transição I_c (A) com um dado diâmetro D (mm) de eletrodo para diferentes materiais e gases de proteção. Elas são válidas para diâmetros entre 0,8 mm e 2,4 mm e extensão de bico de contato de 20 mm.

Tabela 1 - Corrente de transição em função do gás, material e diâmetro de arame

Material	Gás de proteção	Corrente Crítica – I_c (A)
Aços Carbono e Baixa Liga	Argônio + 2% O_2	$151xD+156$
	Argônio + 5% CO_2	$139xD+41$
	Argônio + 18% CO_2	$218xD+26$
Aços Inoxidáveis Austeníticos	Argônio + 1% O_2	$164xD+24$
Cobre Desoxidado	Argônio	$186xD+15$
Bronze de Silício	Argônio	$150xD+32$
Alumínio 1100	Argônio	$51xD+59$
Alumínio 5183	Argônio	$59xD+88$

Fonte: Machado (1996)

Uma variação deste tipo de transferência é a soldagem pulsada em aerossol. Este fenômeno ocorre quando variamos a corrente de soldagem em um nível abaixo da corrente de transição para um nível alto dentro da faixa de transição, onde o metal é transferido apenas quando aplicada a corrente alta dentro da faixa de transição e o arco mantém-se aberto durante a corrente de baixa. Isto permite que o processo todo ocorra em uma corrente média abaixo do aerossol tradicional e, assim, pode-se soldar peças de espessuras menores utilizando arames de diâmetros maiores que nos demais processos.

2.3.3 Gases de proteção

A atmosfera presente na região de soldagem contém alguns contaminantes que influenciam diretamente em diversos pontos críticos para a qualidade e eficiência do cordão de solda. Os principais gases contaminantes encontrados são basicamente o nitrogênio (N_2), oxigênio (O_2) e o vapor d'água (H_2O) que, ao reagirem com os elementos presentes nos fenômenos que ocorrem no processo, podem gerar alguns defeitos e até afetar as características mecânicas do cordão.

Na soldagem MIG, nós teremos o uso de gases de proteção que atuarão no sistema eliminando estes contaminantes e evitando os problemas associados. Os principais gases protetores são o argônio (Ar), hélio (He) e dióxido de carbono (CO_2), que geralmente atuam em mistura com adição de quantidades pré-definidas e seguras de outros gases utilizando-se de suas características.

2.3.3.1 Propriedades dos gases

Dentre os gases de proteção utilizados na soldagem MIG, o argônio é o predominante na indústria e pode ser utilizado na forma pura ou em combinação com outros gases. Fortes (2005) explica que quase todos os processos de soldagem podem utilizar o argônio para usufruir de sua boa soldabilidade, melhorar propriedades mecânicas, características do arco e a produtividade. Ele é geralmente empregado puro para ligas não ferrosas e em mistura com adição de gases ativos em pequena quantidade para ligas ferrosas.

O argônio é um dos gases de proteção mais populares devido suas propriedades adequadas. O argônio possui baixo potencial de ionização e densidade maior que a do ar

atmosférico, o que garante uma ótima condição de soldagem para a posição plana. Sua propriedade inerte possibilita a utilização na soldagem de materiais como alumínio e aço inoxidável, mais sensíveis em comparação aos demais. Quando adicionamos pequenas quantidades de O_2 ou quantidades adequadas de CO_2 , conseguimos também aumentar suas propriedades de soldagem especialmente para arco curto. A exemplo, a adição de até 20% de CO_2 limitará o risco de falta de fusão, enquanto adição de 5 a 8% produzirá respingos reduzidos (WEMAN, 2003, tradução nossa).

Outro gás amplamente utilizado e já mencionado é o dióxido de carbono (CO_2). Sua grande disponibilidade e baixo custo são determinantes para sua grande utilização apesar da alta taxa de desperdício por respingos de solda. Outra grande vantagem é a alta velocidade de soldagem obtida e uma maior penetração de raiz, características que podem ser aproveitadas em uma mistura para atender as necessidades do processo. Wainer (1992) elenca como desvantagens do CO_2 o excesso de respingos e a atmosfera de arco oxidante que pode causar porosidade podendo influenciar nas propriedades mecânicas da junta soldada.

O CO_2 é o mais barato entre os tipos de gases de proteção, tornando-o economicamente preferível. Durante o processo, ele se dissocia no arco gerando uma proteção oxidante. Em temperatura ambiente, exibe características de gás inerte, enquanto à temperatura de soldagem ele passa a apresentar características de gás ativo. Outra característica crítica é sua alta condutividade térmica, a qual é responsável por uma alta transferência de calor para o metal de base (FERRARESI, et al, 2007).

Pouco utilizado no Brasil devido o seu elevado custo, o hélio é um gás inerte utilizado principalmente pelo seu aporte térmico o qual melhora a molhabilidade do cordão. Segundo Fortes (2005), o hélio possui maior condutividade térmica e maior variação de tensão que o argônio, com um perfil de penetração mais largo e mais raso, porém sua utilização na soldagem não proporciona a mesma ação de limpeza do que a encontrada no argônio puro. Assim, o seu alto custo e suas qualidades positivas fazem o hélio ser utilizado geralmente em proporções com o argônio.

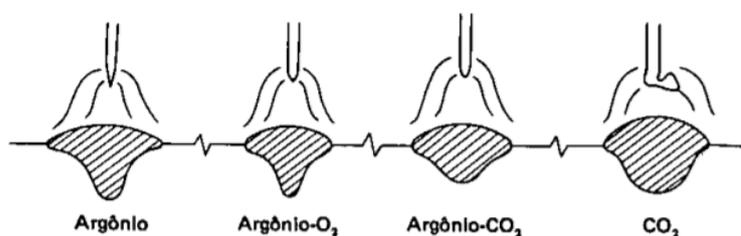
2.3.3.2 Misturas gasosas

As misturas gasosas atuam com o objetivo de unir as características principais dos diferentes gases de proteção, criando assim características intermediárias úteis para determinadas aplicações. Quando falamos em adicionar pequenas quantidades de gases ativos

(CO_2 ou O_2) aos gases inertes, visamos melhorar a estabilidade do arco, aumentar a penetração e diminuir a ocorrência de respingos.

Outro ponto importante influenciado pela adição de gases ativos é a mudança de tipo de transferência metálica. Segundo Fortes (2005), os gases de proteção também determinam o modo de transferência do metal e a profundidade à qual a peça é fundida. A exemplo, a transferência por aerossol não é obtida quando temos a predominância do CO_2 como gás de proteção. Teores de CO_2 mantidos abaixo dos 18% garantem a aplicação pela transferência metálica em aerossol.

Figura 12 - Diferenças de penetração em função do gás de proteção



Fonte: Okumura (1982)

Conforme explica Okumura (1982), o processo MIG proporciona um arco de soldagem bastante constrito, com uma penetração bem profunda na região sob o arco, mas com resultados nada satisfatórios nas regiões adjacentes, detalhe que deve ser levado em consideração para não causar defeitos como a penetração inadequada em diferentes pontos da junta. A Figura 12 ilustra a influência da concentração de CO_2 e O_2 no argônio com a redução da penetração imediatamente sob o arco.

O argônio empregado a uma proporção com 2% de O_2 é preferível na soldagem de aços inoxidáveis, enquanto uma mistura com 5% de O_2 é a mistura argônio-oxigênio mais comumente utilizada na soldagem do aço carbono onde o oxigênio empregado propicia uma maior velocidade de soldagem. No geral, a adição de pequenas quantidades de O_2 no argônio aumenta a estabilidade do arco, a taxa de fusão do arame e, principalmente, reduz o valor de corrente de transição para que ocorra a transferência em aerossol (FORTES, 2005).

O processo MIG mais largamente utilizado na soldagem dos aços carbono e de baixa liga é aquele utilizado em mistura de baixos teores de CO_2 em argônio. Esta mistura só será útil e suficientemente eficiente para teores abaixo dos 18%. Acima disto, a transferência em

aerossol instabiliza e ocorre uma variação entre transferência por curto-circuito e globular, indesejáveis para o processo (SOLCI, 2015).

Uma mistura com proporção de 15% de CO_2 e 85% de argônio é característica quando se deseja a soldagem para chapas mais finas fora de posição e em altas velocidades. Segundo Fortes (2005), misturando o CO_2 nessa faixa, pode ser alcançada a produtividade máxima na soldagem de peças de pequena espessura. Isso é feito minimizando as taxas de deposição e as velocidades de soldagem.

A Tabela 2 relaciona e facilita a seleção do gás de proteção ou mistura que melhor se adequa ao processo a partir do material a ser trabalhado.

Tabela 2 - Seleção de gases de proteção para soldagem MIG/MAG em aerossol

Metal	Ar	He	Ar-O ₂	Ar-CO ₂	Ar-He	Ar-He-CO ₂	Ar-O ₂ -CO ₂ ⁽²⁾	Ar-CO-H ₂	CO ₂ ⁽³⁾
Alumínio	X	X			10-90 (25-75)				
Aços carbono			(98-2) (95-5)	(85-15) (92-8) (75-25) ⁽¹⁾ PULSADO 95-5			(>90-<5-<10) (95-2,5-7,5)		X
Aços de baixa liga			(98-2)	(92-8)		(2,5-96-1,5)	(>90-<5-<10) ACIMA DE 2,4 mm (95-2,5-7,5)		
Cobre e bronze ao silício	X	X			(10-90) (25-75)				
Aços inoxidáveis			(99-1) (98-2)					H ₂ -1 CO ₂ -2	
Ligas de Níquel	X	X			(25-75)				
Metais reativos	X	X							

Fonte: Fortes (2005)

2.3.4 Arame eletrodo

A seleção correta do arame de solda a ser utilizado é ponto crítico na definição do processo. Segundo Modenesi (2009), a seleção do arame a ser usado numa dada operação é

feita em termos da composição química do metal de base, do gás de proteção a ser usado e da composição química e propriedades mecânicas desejadas para solda.

De modo a simplificar a seleção do arame ideal, a AWS (*American Welding Society*) desenvolveu arames de solda com os melhores resultados para materiais de base específicos. A Tabela 3 relaciona as especificações AWS para a soldagem MIG/MAG de diferentes materiais.

Tabela 3 - Especificações AWS para soldagem MIG/MAG

Especificação	Consumível
AWS A 5.7	Arames de cobre e suas ligas
AWS A 5.9	Arames de aço inoxidável
AWS A 5.10	Arames de alumínio e suas ligas
AWS A 5.14	Arames de níquel e suas ligas
AWS A 5.15	Arames para soldagem de ferro fundido
AWS A 5.16	Arames de titânio e suas ligas
AWS A 5.18	Arames e arames tubulares de aço carbono com pó metálico interno
AWS A 5.19	Arames de magnésio e suas ligas
AWS A 5.20	Arames tubulares de aço carbono com fluxo interno
AWS A 5.21	Arames para revestimento
AWS A 5.22	Arames tubulares para soldagem de aço inoxidável
AWS A 5.24	Arames para a soldagem de zircônio
AWS A 5.28	Arames de aços de baixa liga

Fonte: Modenesi (2009)

É crucial a correta seleção do arame de acordo com os elementos de liga que o compõem devido às suas funções básicas de controlar a desoxidação e definir propriedades mecânicas à junta soldada. O manganês (Mn) e o silício (Si), por exemplo, são importantíssimos na aplicação para arames usados na soldagem MIG com proteção de CO_2 pois possuem maior ação desoxidante. A Tabela 4 sintetiza os requisitos de composição química para arames de aços doces e de baixa liga pela especificação AWS A 5.18.

Tabela 4 - Composição química para arames de aços doces e baixa liga

AWS	ESAB	C	Mn	Si	S	P	Mo	Outros
ER70S-2	65	0,07	0,90-1,40	0,40-0,70	≤0,035	≤0,025	-	0,05-0,15 Ti 0,02-0,12 Zr 0,05-0,15 Al
ER70S-3	29S ou 82	0,06-0,15	0,90-1,40	0,45-0,75	≤0,035	≤0,025	-	
ER70S-4	85	0,07-0,15	1,00-1,50	0,65-0,85	≤0,035	≤0,025	-	
ER70S-5	-	0,07-0,19	0,90-1,40	0,30-0,60	≤0,035	≤0,025	-	0,50-0,90 Al
ER70S-6	OK 12.51	0,07-0,15	1,40-1,80	0,80-1,15	≤0,035	≤0,025	-	
ER70S-7	87HP	0,07-0,15	1,50-2,00	0,50-0,80	≤0,035	≤0,025	-	
ER80S-D2	83 ou Hi84	0,07-0,12	1,60-2,10	0,50-0,80	≤0,035	≤0,025	0,40-0,60	
ER70S-G	não especificado - requisitos a serem acordados entre o cliente e o fornecedor							

Fonte: Fortes (2005)

2.4 DEFEITOS DE SOLDAGEM

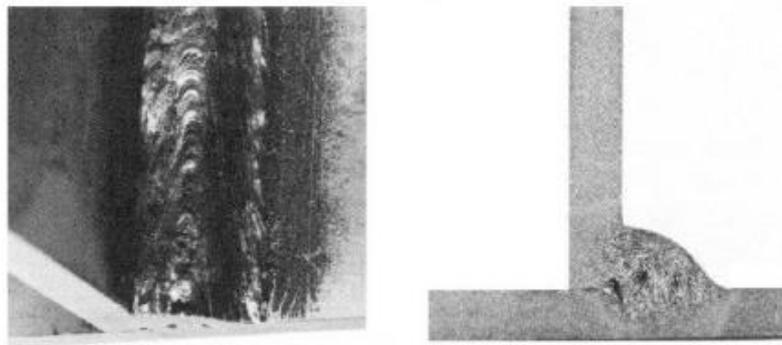
A tecnologia da soldagem possui e define parâmetros bem assertivos que, quando corretamente seguidos, resultam em uma solda de alta qualidade e livre de anomalias. Entretanto, diversos são os fatores que podem influenciar no processo e todos estes fatores encontram-se em equilíbrio. Quando temos a perda desse equilíbrio com alguma variável não atuando corretamente, temos problemas que inicialmente parecerão simples, mas podem gerar situações indesejáveis para o sistema. De acordo com a Sociedade Americana de Engenheiros Mecânicos (ASME), as causas destes defeitos podem ser divididas da seguinte forma: 41% por parametrização de processo desfavorável, 32% por erro operacional, 12% por utilização de técnicas incorretas, 10% pela seleção incorreta dos consumíveis, e 5% anomalias nos sucos de soldagem. Como defeitos mais comuns, temos: porosidade, trincas, falta de penetração, inclusão e distorção.

2.4.1 Porosidade

A porosidade é um dos defeitos mais comuns encontrados na soldagem de metais. Seja por aspecto estético ou de resistência de junta, este defeito compromete significativamente a qualidade do produto. Em termos técnicos, ela surge a partir de gases aprisionados durante o processo de solidificação do metal de solda. Basicamente, estes gases referem-se ao nitrogênio e o oxigênio, tendo este último uma tolerância maior sem gerar poros na ausência

do nitrogênio. Este fenômeno pode se apresentar no cordão de solda tanto na superfície como abaixo da mesma, sendo mais comumente encontrado próxima à superfície devido a tendência de os gases tentarem escapar para a atmosfera.

Figura 13 - Porosidade em solda MIG

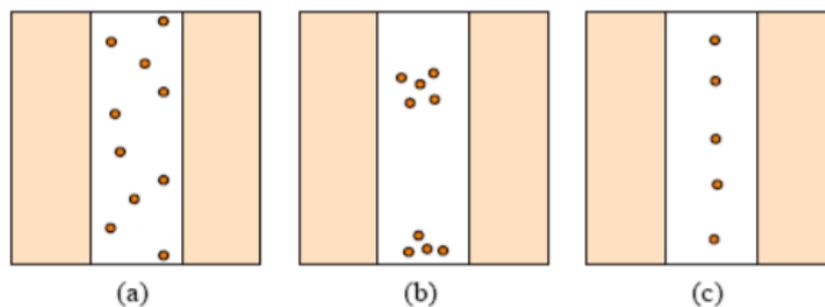


Fonte: Fortes (2005)

Modenesi (2009) define como causas práticas desta descontinuidade a umidade ou contaminação de óleo, graxa ou ferrugem na região de junta, eletrodo, fluxo ou gás de proteção úmidos; corrente ou tensão de soldagem excessivas e correntes de ar durante a soldagem que impedem a ação dos gases de proteção. Stenbacka (1987) atribui também a formação mecânica dos poros como uma causa deste fenômeno, quando o metal de solda se solidifica antes de preencher todo o espaço da junta levando à formação de vazios.

De uma maneira geral, a presença ou não de poros depende da relação entre a velocidade de solidificação e a velocidade de subida do poro para a atmosfera livre. Assim, podemos classificá-las conforme a Figura 14.

Figura 14 - Tipos de porosidade: (a) distribuída, (b) agrupada e (c) alinhada



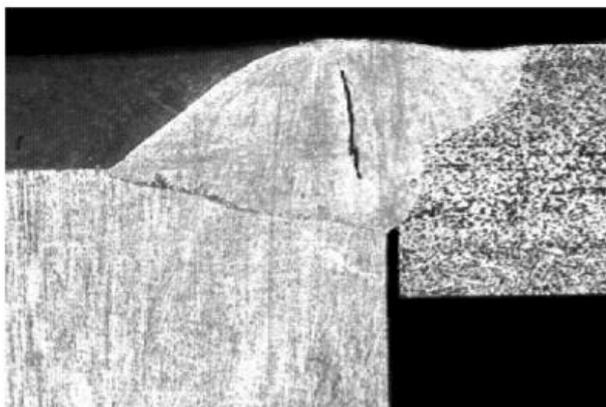
Fonte: Modenesi (2001)

Assim, quando a velocidade de subida da bolha for menor que a velocidade de solidificação do metal, ocorre a porosidade agrupada. Já quando as velocidades forem próximas, ocorre a porosidade do tipo alinhada e apresenta-se, em geral, no passe de raiz.

2.4.2 Trincas

Podemos considerar a trinca como o defeito mais grave de descontinuidade em juntas soldadas. Trincas (Figura 15) são concentradores de tensão formados na zona soldada a partir de tensões de tração que se formam durante o processo de solda mediante aplicação de calor e posterior resfriamento influenciada pela expansão e contração térmica, por variações de volume devido a transformações de fase ou pela presença de elementos nocivos (hidrogênio). Segundo Modenesi (2001), as trincas podem se formar durante ou logo após a soldagem, em outras operações de fabricação subsequentes ou durante o uso do equipamento e resultam, em geral, devido a algum problema de fragilização.

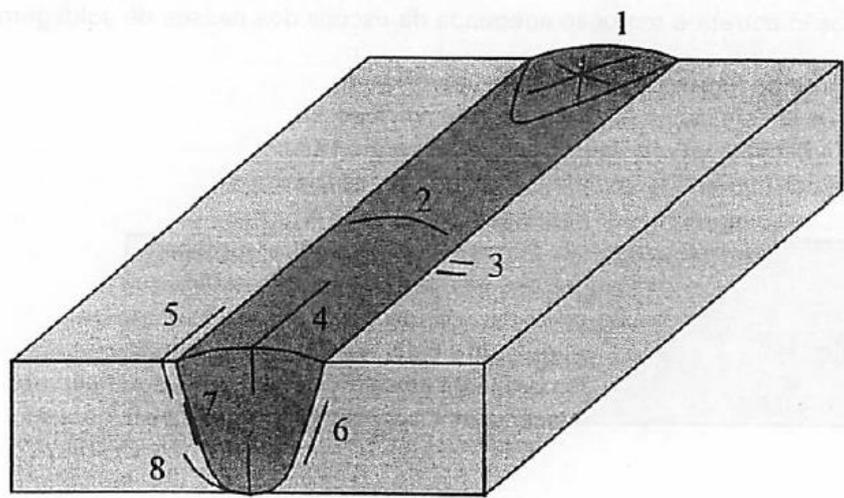
Figura 15 - Trinca centralizada formada em aço SAE 1045



Fonte: Modenesi (2009)

Basicamente, as trincas podem ser classificadas em: trincas a quente e trincas a frio. Okumura (1982) explica que as trincas a frio ocorrem a temperaturas inferiores a 300°C e não apenas na ZTA, mas também no metal depositado. As trincas na ZTA podem ser subdivididas em: trinca sob o cordão, trinca na raiz, trinca no pé da solda e trinca lamelar. Já aquelas formadas no metal depositado dividem-se em longitudinais e transversais. A Figura 16 mostra os principais formatos de trincas por posição. Segundo explica Modenesi (2009), a trinca a frio aparece um certo tempo após a soldagem e cresce de forma lenta levando até dois dias para se desenvolver completamente.

Figura 16 - Classificação das trincas de acordo com sua localização: (1) em cratera, (2) transversal na ZF, (3) transversal na ZTA, (4) longitudinal na ZF, (5) na margem da solda, (6) sob o cordão, (7) na linha de fusão e (8) na raiz da solda.



Fonte: Modenesi (2009)

Já a trinca a quente pode ocorrer durante a solidificação no metal de solda ou na ZTA a temperaturas superiores a 900° e na zona afetada principalmente devido a alívios de tensões quando o aço é soldado e depois reaquecido entre 550 e 700°C (OKUMURA, 1982).

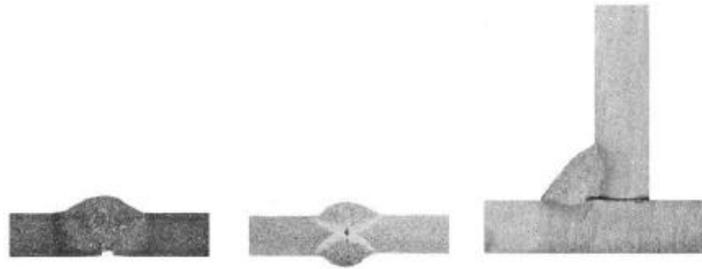
2.4.3 Falta de penetração

Segundo Fortes (2005), a descontinuidade por falta de penetração (Figura 17) ocorre geralmente em um dos três casos:

- a) Quando o cordão de solda não penetrar completamente na abertura de raiz;
- b) Quando dois cordões de solda opostos não se penetrarem;
- c) Quando o cordão não penetrar na garganta de uma junta em ângulo.

Scotti (2008) traz como principais causas desta anomalia a manipulação incorreta de eletrodo, uma junta mal projetada, corrente de soldagem insuficiente para o procedimento, uma velocidade de soldagem muito alta e diâmetro do eletrodo muito grande. Como consequências, temos uma região com concentração significativa de tensão.

Figura 17 - Exemplos de falta de penetração



Fonte: Fortes (2005)

2.4.4 Distorção

Distorções são alterações dimensionais que ocorrem no material soldado ocasionadas pelo aquecimento proveniente do processo de soldagem. Elas podem ser evitadas utilizando-se dispositivos que fixem as peças de modo a travá-las impedindo o seu deslocamento. Pode-se também ser evitada fazendo a escolha correta da sequência de soldagem, intercalando a solda minimizando os efeitos do aquecimento (SOLCI, 2015).

2.4.5 Inclusão de escória

Vários processos de soldagem utilizam fluxos que formam escória que tende a se separar do metal na poça de fusão e parte desta escória pode manter-se aprisionada entre os passes de solda ou entre o metal de base. Modenesi (2009) explica que esta anomalia, representada na Figura 18, ocorre quando há uma má manipulação do eletrodo de tal forma que a escória flui a frente da poça de fusão e estas são futuras concentradoras de tensão acarretando problemas maiores ao produto.

Figura 18 - Esquematização da inclusão de escória



Fonte: Modenesi (2009)

2.5 INFLUÊNCIA DO FLUXO DE GÁS

Segundo Machado (1996), tanto a vazão de gás excessivamente alta, quanto a muito baixa, resultam na produção de descontinuidades que elevam o custo do processo. Ele explica que, de uma forma geral, o fluxo do gás utilizado deve ser laminar e, portanto, respeitar um número (adimensional) de Reynolds menor que 2000. Assim, a máxima velocidade de escoamento pode ser descrita conforme Equação 1:

$$V_{critica} \leq 2000 \cdot \mu / (D \cdot \rho) \quad (1)$$

Onde: D = diâmetro do condutor; μ = viscosidade do fluido; ρ = densidade do fluido.

A importância da velocidade do fluxo se dá pelo fato de quanto maior a vazão, mais alta será a velocidade do fluxo e maior a pressão sobre o metal fundido. Caso a velocidade seja alta o suficiente para o fluxo atingir o regime turbulento, haverá sucção de ar para o interior do arco (MACHADO, 1996).

Alguns fatores específicos determinam a vazão correta de gás a ser utilizada, como intensidade da corrente, o material do arame e o diâmetro do bocal de tocha. Estes fatores são correlacionados a partir da Tabela 5 e Tabela 6.

Tabela 5 - Vazão dos gases de proteção em função do material do arame e corrente

Material do Arame	Vazão para a Corrente de 100A (l/min)	Vazão para Cada Acréscimo de Corrente de 50A (l/min)
Aços	10	1,5
Alumínio, Níquel e suas Ligas	14	2,0
Cobre e suas Ligas	18	0,5
Magnésio e suas Ligas	20	1,5

Fonte: Machado (1996)

Tabela 6 - Diâmetro de bocal em função da vazão de gás selecionada

Vazão (l/min)	Diâmetro (mm)
8 a 11	14
10 a 13	16
12 a 18	18
20 a 25	20

Fonte: Machado (1996)

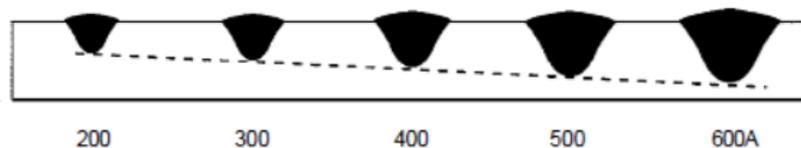
2.6 INFLUÊNCIA DA CORRENTE

Segundo Guedes (2009), a corrente de soldagem é um dos parâmetros importantíssimos para a soldagem, pois é o fluxo de corrente que dará energia de soldagem necessária para a formação da poça de fusão e todo o aporte térmico necessário para a homogeneidade do processo.

A corrente elétrica na soldagem MIG/MAG é controlada pela velocidade do arame e, quanto maior esta velocidade, maior a quantidade de eletrodo a ser fundido e mais corrente de soldagem é fornecida pela fonte (SOLCI, 2015).

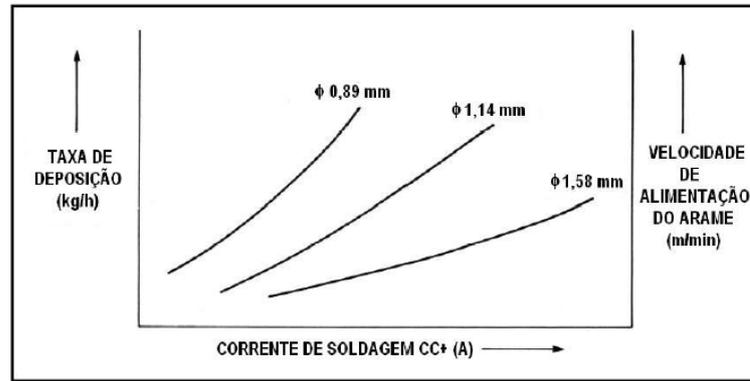
A principal influência desta variável está no controle da penetração de solda, como representado na Figura 19. Segundo Fortes (2005), as características de altura e largura do cordão de solda são importantes para garantir que a junta seja completamente preenchida com um mínimo de defeitos e, para alterarmos essas características, deve ser mudada a quantidade de material depositado a partir da influência da corrente de soldagem. A Figura 20 mostra a variação da taxa de deposição com a corrente de soldagem.

Figura 19 – Efeito da intensidade da corrente na geometria de solda



Fonte: Mendes (2009)

Figura 20 – Penetração de solda em função da corrente de soldagem Ar-25%CO₂



Fonte: Fortes (2005)

Um fato importante representado na Figura 20 é que quanto maior a corrente de soldagem, mais alta a taxa de queima do arame que começa a agir de forma exponencial.

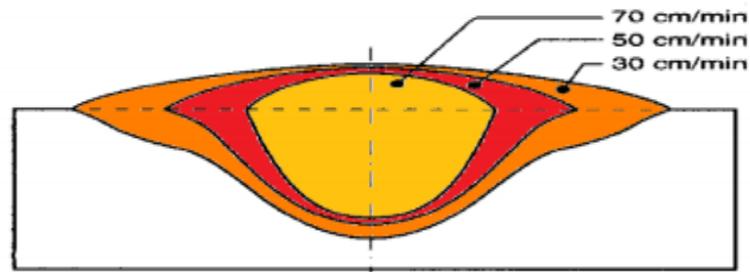
2.7 INFLUÊNCIA DA VELOCIDADE DE AVANÇO

A velocidade de avanço é a relação entre a distância percorrida pelo arco ao longo do perímetro da peça e o tempo gasto para percorrê-lo, que geralmente é expressa em cm/min ou mm/min. Segundo Fortes (2005), três regras gerais podem ser apontadas com respeito à velocidade de soldagem:

- Quando a espessura da peça aumenta, a velocidade de avanço deve diminuir;
- Para uma dada espessura de peça e tipo de junta, quando a velocidade de avanço aumentar, a corrente também deve aumentar e vice-versa;
- Maiores velocidades são alcançadas com a técnica de soldagem empurrada.

A velocidade de avanço tem uma grande influência na largura e profundidade do cordão de soldadura. Desta forma velocidades elevadas de avanço produzem soldaduras de baixas espessuras e com pequena penetração. Velocidades de soldadura muito elevadas podem originar corte por soldadura, porosidade, deposição insuficiente e sopro magnético do arco mais elevado. Baixas velocidades resultam numa soldadura de forma irregular, já com velocidades excessivamente baixas produzem-se soldaduras com penetração em forma de “cogumelo”, que pode originar a fissuração da soldadura (MENDES, 2009).

Figura 21 - Efeito da velocidade de avanço na geometria de solda

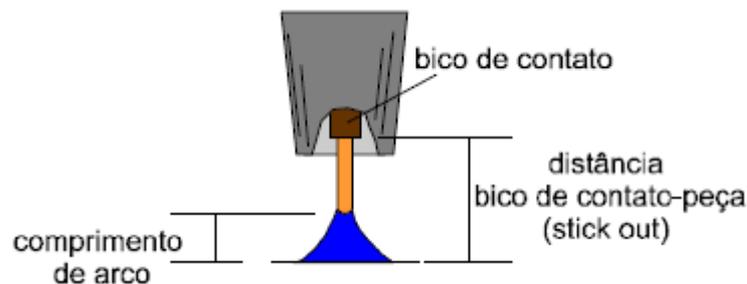


Fonte: Mendes (2009)

2.8 EXTENSÃO DO ELETRODO (*STICK-OUT*)

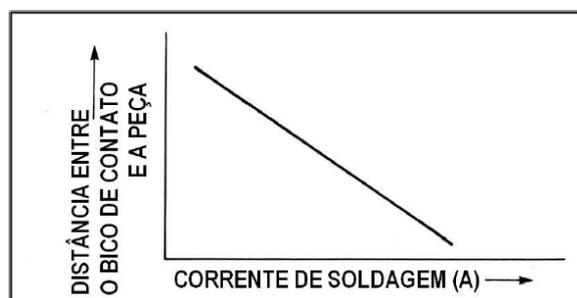
A extensão do eletrodo, também conhecido como *stick-out*, é a distância entre a extremidade do bico de contato até a peça de trabalho. A Figura 22 ilustra a extensão do eletrodo juntamente com a altura do arco elétrico que dificilmente é medido na prática.

Figura 22 - Distância entre o bico de contato e a peça



Fonte: Solci (2005)

Segundo Solci (2015), com o aumento da extensão do eletrodo temos uma queda na amperagem e uma elevação na voltagem de serviço. Uma menor quantidade de corrente é necessária para fundir o arame devido ao aquecimento do mesmo pelo aumento da resistência elétrica do circuito. Portanto, aumentando-se o *stick-out*, aumentamos a taxa de fusão do arame e vice-versa. Este fenômeno trata-se do efeito Joule atuando sobre o sistema. A Figura 23 ilustra a relação entre estes fatores.

Figura 23 - Efeito do *stick-out* na corrente de soldagem

Fonte: Fortes (2005)

Valores altos de *stick-out* resultam, por exemplo, em uma geometria desfavorável do cordão e baixa penetração causadas pelo excesso de metal de solda depositado a um baixo calor de arco. Analogamente, estes valores tornam o arco menos estável. Estes pontos enfatizam a importância da constância *stick-out* do durante a atividade de soldagem (FORTES, 2005).

2.9 MICROESTRUTURA DO CORDÃO DE SOLDA

A região de solda geralmente apresenta uma microestrutura diversa, basicamente constituída em Zona de Fusão (ZF), Zona Termicamente Afetada (ZTA) e Metal de Base (MB), os quais podemos descrever:

- a) **Metal de Base (MB):** é constituída basicamente pelo metal de base, geralmente oriundo de processos de laminação com predominância de ferlita e perlita;
- b) **Zona Termicamente Afetada (ZTA):** é a zona alterada pelo ciclo térmico do processo de soldagem, quando ocorre austenitização ou dissolução de fase, além do crescimento de grão. Esta, após o resfriamento, pode transformar-se em ferrita poligonal, bainita ou martensita;
- c) **Zona de Fusão:** é formada por contribuições do metal base e do metal de adição, que são misturados, no estado líquido, na poça de fusão. Esta, é principalmente controlada pela composição química e a taxa de resfriamento.

Para Carminati (2009), os constituintes presentes no metal de solda são definidos da seguinte forma:

- a) **Ferrita Primária de Contorno de Grão – PF(G):** é o primeiro produto a se formar na decomposição da austenita, formando-se a taxas de resfriamento muito lento;
- b) **Ferrita Acicular – AF:** constituinte que se apresenta na forma de grãos extremamente finos de ferrita não paralelas, nucleando-se no interior do grão da austenita;
- c) **Ferrita com Segunda Fase Alinhada – FS(A):** constituinte formado por grãos grosseiros e paralelos que crescem ao longo de um plano, formado com duas ou mais ripas de ferrita paralelas.

Conforme explica Venson (2009), a austenita é uma solução sólida de carbono em ferro gama. Somente é estável as temperaturas superiores a 723 °C, desdobrando-se por reação eutetóide, a temperaturas inferiores, em ferrita e cementita. Somente pode aparecer austenita a temperatura ambiente nos aços austeníticos, nesse caso, a austenita é estável a temperatura ambiente. É deformável como o ferro gama, pouco dura, apresenta grande resistência ao desgaste, é magnética, e é o constituinte mais denso dos aços e não é atacada por reagentes.

Já a perlita é formada por uma mistura eutetóide de duas fases, ferrita e cementita, produzida a 723 °C quando a composição é de 0,8 %. Sua estrutura está constituída por lâminas alternadas de ferrita e cementita, sendo a espessura das lâminas de ferrita superior ao das de cementita, estas últimas ficam em relevo depois do ataque com ácido nítrico. A perlita é mais dura e resistente que a ferrita, porém mais branda e maleável que a cementita. Apresenta-se em forma laminar, reticular e globular.

Também presente na constituição dos aços, a bainita é o constituinte que se obtém na transformação isotérmica da austenita quando a temperatura do banho de resfriamento é de 250 a 500 °C. Apresenta 2 tipos de estrutura: a bainita superior de aspecto arborescente formada a 500 – 580 °C, composta por uma matriz ferrítica contendo carbonetos e a bainita inferior, formada a 250 – 400 °C, tem um aspecto similar a martensita e está constituída por agulhas alargadas de ferrita que contém placas finas de carboneto. A bainita tem dureza que vai de 40 a 60 HRc (VENSON, 2009)

Conforme explica Huallpa (2006), a martensita é usualmente uma solução sólida supersaturada de carbono no ferro e tem uma estrutura tetragonal de corpo centrado, que é uma forma distorcida de ferrita com estrutura cúbica de corpo centrado.

3 METODOLOGIA

3.1 MATERIAIS

O material utilizado como metal de base para confecção da junta soldada foi o aço estrutural ASTM A36 laminado por processo convencional, cuja composição está descrita em percentual na Tabela 7.

Tabela 7 - Composição química do aço ASTM A36

Elemento Químico	%
C	0,1867
Si	0,0100
Mn	0,7200
P	0,0200
S	0,0051
Al	0,0360
Cu	0,0090
Ni	0,0050
Cr	0,0270
Mo	0,0010
N	0,0039
Sn	0,0010
Co	0,0010
Zr	0,0010
Sb	0,0010
Ca	0,0001

Fonte: Autor

O arame utilizado para preenchimento da junta soldada foi o de classificação AWS A5.18-17 ASME SFA5.18 / 2019 ER70S-6 com diâmetro de 1,0 mm. As Tabelas 8 e 9 apresentam, respectivamente, a composição química e as propriedades mecânicas obtidas através do catálogo do fabricante.

Tabela 8 - Composição do arame AWS A5.18-17 ASME SFA5.18 / 2019 ER70S-6

Elemento Químico	%
Mn	1,5740
Si	0,9210
C	0,0900
S	0,0090
P	0,0130
Cr	0,0148
Ni	0,0131
Mo	0,0025
Cu	0,0203
V	0,0042
Al	0,0027

Fonte: ESAB

Tabela 9 - Propriedades mecânicas do arame AWS A5.18-17 ASME SFA5.18 / 2019 ER70S-6

Propriedade Mecânica	Valor de referência
Limite de escoamento (MPa)	400
Limite de resistência (MPa)	490
Alongamento (%)	22
Ensaio Charpy a -30°C (J)	27

Fonte: ESAB

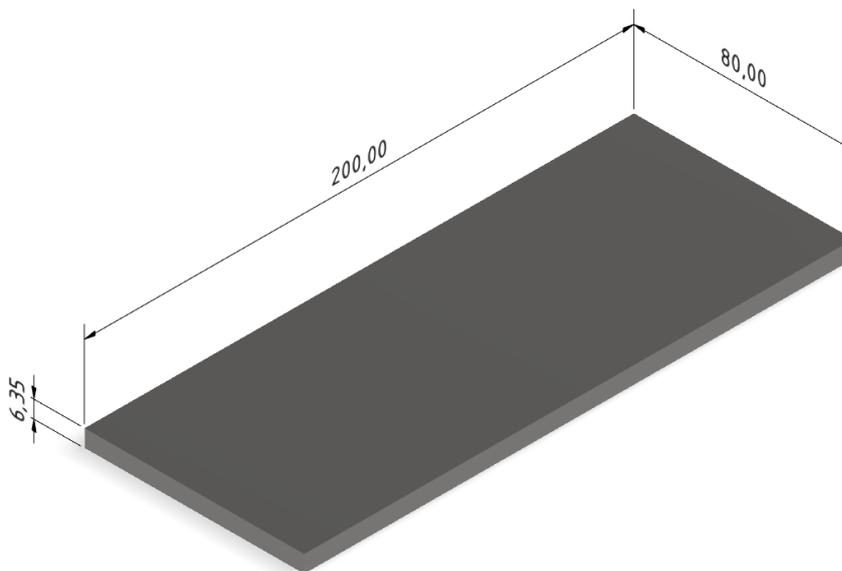
3.2 MÉTODOS

3.2.1 Preparação das juntas soldadas

Para fabricação das juntas soldadas foram utilizadas seções de chapas de aço carbono de classificação ASTM A36 com dimensões de 80 mm x 200 mm x 6,35 mm conforme o desenho apresentado na Figura 24 elaborado com o auxílio do software Autodesk Inventor.

Ao total foram confeccionadas 6 (seis) juntas soldadas na posição plana, chanfro V e abertura de raiz de 1,0 mm com utilização de restrição. A Figura 25 apresenta uma imagem da montagem das chapas antes do procedimento de soldagem. Para distinção das juntas soldadas devido os parâmetros utilizados para cada uma, elas foram denominadas da seguinte forma: AC1, AC2, AC3, AC4, AP1 e AP2.

Figura 24 - Geometria de chapa de aço para confecção da junta soldada



Fonte: Autor

Figura 25 - Montagem para fabricação das juntas soldadas



Fonte: Autor

3.2.2 Procedimento de soldagem

As juntas soldadas foram confeccionadas através do processo MIG com gás de proteção na proporção de Ar 85% / CO_2 15%.

Os procedimentos de soldagem das juntas soldadas foram realizados através de 01 (um) passe de forma manual e com utilização de dois programas, cujos parâmetros e tempos estão apresentados na Tabela 10.

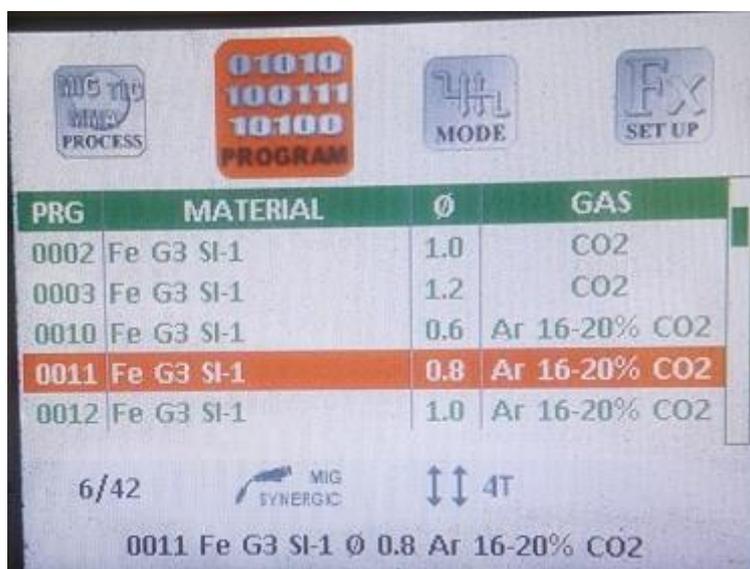
O programa 12 é específico para operações MIG com arame de diâmetro de 1,0 mm. Porém, atualmente os soldadores da empresa onde o estudo foi desenvolvido utilizam o programa 11 que é específico para arame de diâmetro de 0,8 mm. A principal diferença entre os programas é velocidade de alimentação de arame, onde no programa 11 obtém-se uma velocidade superior ao do programa 12. A Figura 26 apresenta o display onde se encontram o programa 11 e 12 da máquina de solda utilizada CEA DIGITECH VP2.

Tabela 10 - Parâmetros de soldagem

Parâmetros	AC1	AC2	AP1	AC3	AC4	AP2
Programa	12	12	12	11	11	11
Tensão (V)	18	18	18	18	18	18
Corrente (A)	165	165	165	165	165	165
Vazão (l/min)	15	12	30	15	12	30
Tempo (s)	50	50	51	23	25	26
Velocidade de soldagem (mm/s)	4	4	3,9	8,7	8	7,7

Fonte: Autor

Figura 26 - Display do alimentador de arame



Fonte: Autor

3.2.3 Caracterização metalográfica

A preparação metalográfica foi iniciada com o corte da chapa em uma serra de fita e logo em seguida o material foi levado para fresadora para regularização das dimensões, ambas sob refrigeração. Após os procedimentos de corte e regularização das dimensões, foi realizado o lixamento das amostras com lixadeira/politriz com lixas de granulometrias na sequência

180, 220, 320, 400, 600 e 1200. Após o lixamento foi realizado polimento utilizando pasta abrasiva de alumina com granulometria de 3 μm (ASTM E3, 1995; MANNHEIMER, 2002).

3.2.4 Análise Macrográfica e Micrográfica

A análise macrográfica das juntas soldadas, foi realizada com o objetivo de verificação da distribuição dos cordões de solda e presença de defeitos nas regiões formadas após o processo de soldagem. Já para análise micrográfica das juntas soldadas com o objetivo de verificação da formação microestrutural após o processo de soldagem foi utilizado o microscópio ótico e ataque químico com reagente Nital 2% durante 15s.

4 RESULTADOS E DISCUSSÕES

No presente capítulo são apresentados, analisados e discutidos os resultados obtidos nos ensaios realizados. Nesta etapa foram realizadas análise macroestrutural e microestrutural.

4.1 Macrografia

4.1.1 Junta Soldada Confeccionada com Vazão de Gás de 15 l/min e Utilização do Programa 12

As Figuras 27 e 28 apresentam as imagens das juntas soldadas obtidas com vazão de gás de 15 l/min e utilização do programa indicado para arame de diâmetro 1,0 mm.

Na Figura 27 é possível observar um cordão de solda uniforme com preenchimento aparente de todo o chanfro. Já na Figura 28 obtida após a operação de jateamento abrasivo para retirada da carepa do aço e impurezas é possível observar uma falta de preenchimento em uma das laterais do chanfro indicando um possível problema operacional.

Figura 27 - Junta soldada AC1



Fonte: Autor

Figura 28 - Junta soldada AC1 após jateamento abrasivo



Fonte: Autor

4.1.2 Junta Soldada Confeccionada com Vazão de Gás de 12 l/min e Utilização do Programa 12

As Figuras 29 e 30 apresentam as imagens das juntas soldadas obtidas com vazão de gás de 12 l/min e utilização do programa indicado para arame de diâmetro 1,0 mm.

Assim como na junta soldada obtida com vazão de gás de 15 l/min e programa para arame de 1,0 mm, na Figura 29 é possível observar um cordão de solda uniforme com preenchimento aparente de todo o chanfro. Já na Figura 30 obtida após a operação de jateamento abrasivo para retirada da carepa do aço e impurezas é possível observar uma falta de preenchimento em uma das laterais do chanfro indicando um possível problema operacional.

Figura 29 - Junta soldada AC2



Fonte: Autor

Figura 30 - Junta soldada AC2 após jateamento abrasivo



Fonte: Autor

4.1.3 Junta Soldada Confeccionada com Vazão de Gás de 30 l/min e Utilização do Programa 12

As Figuras 31 e 32 apresentam as imagens das juntas soldadas obtidas com vazão de gás de 30 l/min e utilização do programa indicado para arame de diâmetro 1,0 mm.

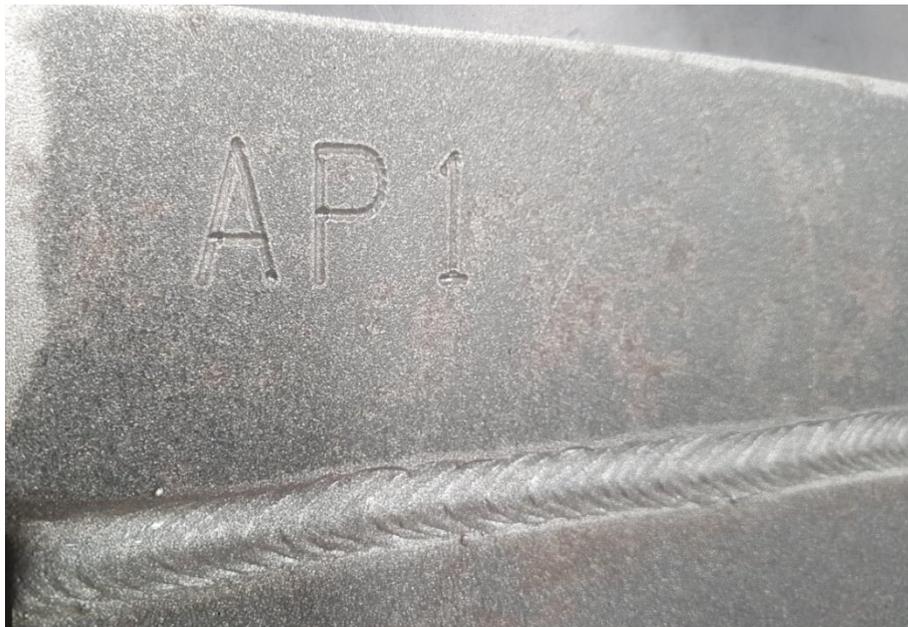
Na Figura 31 é possível observar um cordão de solda uniforme com preenchimento de todo o chanfro. Já na Figura 32 obtida após a operação de jateamento abrasivo para retirada da carepa do aço e impurezas é possível observar que não houve a falta de preenchimento em uma das laterais do chanfro como ocorrido com as vazões de 15 e 12 l/min.

Figura 31 - Junta soldada API



Fonte: Autor

Figura 32 - Junta soldada API após jateamento abrasivo



Fonte: Autor

4.1.4 Junta Soldada Confeccionada com Vazão de Gás de 15 l/min e Utilização do Programa 11

As Figuras 33 e 34 apresentam as imagens das juntas soldadas obtidas com vazão de gás de 15 l/min e utilização do programa indicado para arame de diâmetro 0,8 mm.

Na Figura 33 é possível observar um cordão de solda uniforme e suave com preenchimento aparente de todo o chanfro. Já na Figura 34 obtida após a operação de jateamento abrasivo para retirada da carepa do aço e impurezas é possível observar uma falta de preenchimento em uma das laterais do chanfro indicando um possível problema operacional.

Figura 33 - Junta soldada AC3



Fonte: Autor

Figura 34 - Junta soldada AC3 após jateamento abrasivo



Fonte: Autor

4.1.5 Junta Soldada Confeccionada com Vazão de Gás de 12 l/min e Utilização do Programa 11

As Figuras 35 e 36 apresentam as imagens das juntas soldadas obtidas com vazão de gás de 12 l/min e utilização do programa indicado para arame de diâmetro 0,8 mm.

Assim como na junta soldada obtida com vazão de gás de 15 l/min e programa para arame de 0,8 mm na Figura 35 é possível observar um cordão de solda uniforme e suave com preenchimento aparente de todo o chanfro. Já na Figura 36 obtida após a operação de jateamento para retirada da carepa do aço e impurezas é possível observar uma falta de preenchimento em uma das laterais do chanfro e respingos na junta soldada.

Figura 35 - Junta soldada AC4



Fonte: Autor

Figura 36 - Junta soldada AC4 após jateamento abrasivo



Fonte: Autor

4.1.6 Junta Soldada Confeccionada com Vazão de Gás de 30 l/min e Utilização do Programa 11

As Figuras 37 e 38 apresentam as imagens das juntas soldadas obtidas com vazão de gás de 30 l/min e utilização do programa indicado para arame de diâmetro 0,8 mm.

Assim como nas juntas soldadas obtidas com vazões de gás de 15 e 12 l/min e programa para arame de 0,8 mm, na Figura 37 é possível observar um cordão de solda uniforme e suave com preenchimento aparente de todo o chanfro. Já na Figura 38 obtida após a operação de jateamento abrasivo para retirada da carepa de aço e impurezas é possível observar uma falta de preenchimento em uma das laterais do chanfro e respingos na junta soldada.

Figura 37 - Junta soldada AP2



Fonte: Autor

Figura 38 - Junta soldada AP2 após jateamento abrasivo



Fonte: Autor

4.2 Micrografia

4.2.1 Junta Soldada Confeccionada com Vazão de Gás de 15 l/min e Utilização do Programa 12

Nas micrografias obtidas das regiões da junta soldada (Metal de Base, Zona Termicamente Afetada e Zona Fundida) através de microscopia ótica com aumento de 200x é possível observar as microestruturas formadas nas regiões da junta soldada.

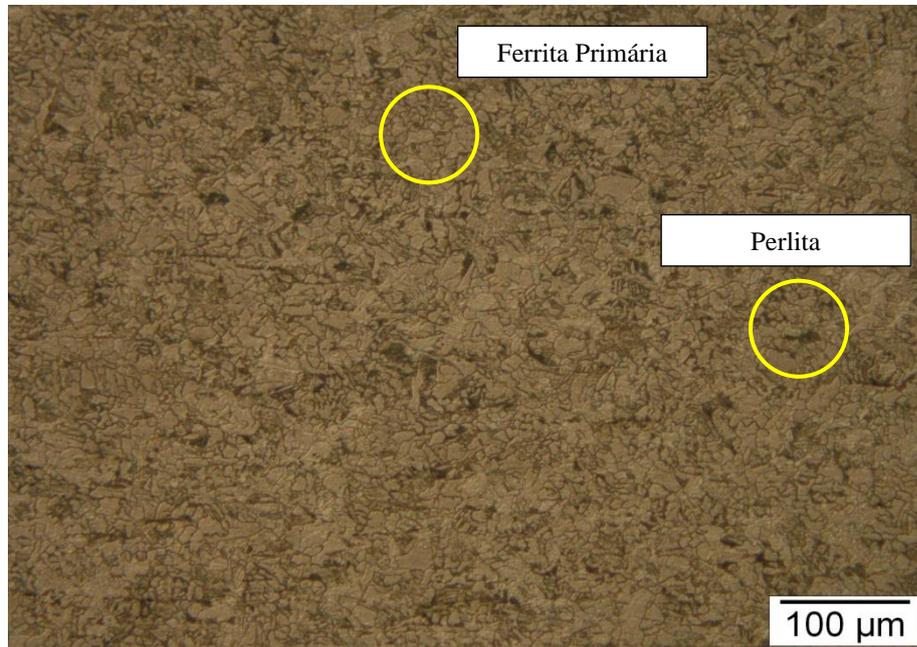
No Metal de Base (Figura 39) foi identificada a presença de uma microestrutura formada por ferrita primária e perlita. Estas microestruturas indicam que o material possui uma boa ductilidade e consequentemente boa tenacidade.

Na Zona Fundida (Figura 40) é possível observar uma microestrutura formada por ferrita com segunda fase, ferrita de contorno de grão e a presença de bainita.

Na Zona Termicamente Afetada (Figura 41) foi identificado a presença de uma microestrutura formada predominantemente por ferrita com segunda fase e ferrita de contorno de grão. Essa microestrutura tem como característica a não resistência a propagação de trincas e como consequência problemas com a tenacidade.

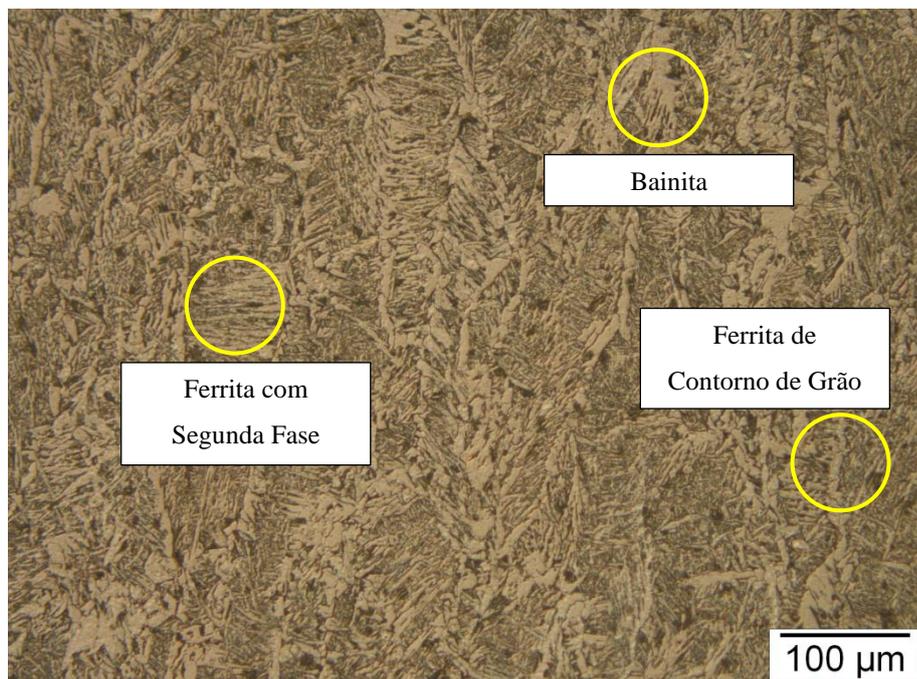
Ao contrário da martensita a bainita é desejável em juntas soldadas dependendo de sua aplicação, pois confere uma maior resistência com um pouco de tenacidade.

Figura 39 - Metal de Base 200x AC1



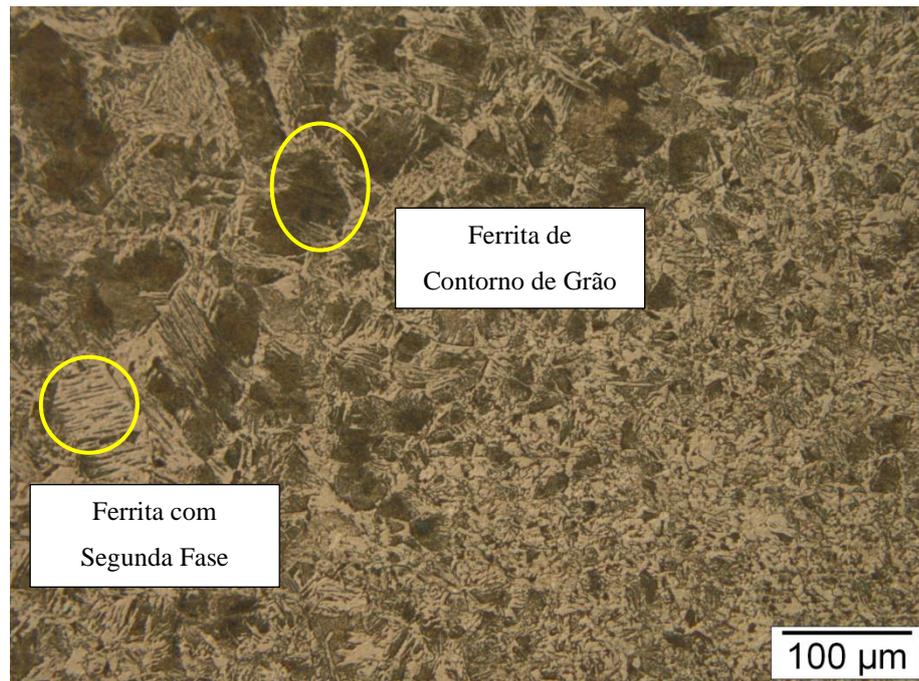
Fonte: Autor

Figura 40 - ZF 200x AC1



Fonte: Autor

Figura 41 - ZTA 200x AC1



Fonte: Autor

4.2.2 Junta Soldada Confeccionada com Vazão de Gás de 12 l/min e Utilização do Programa 12

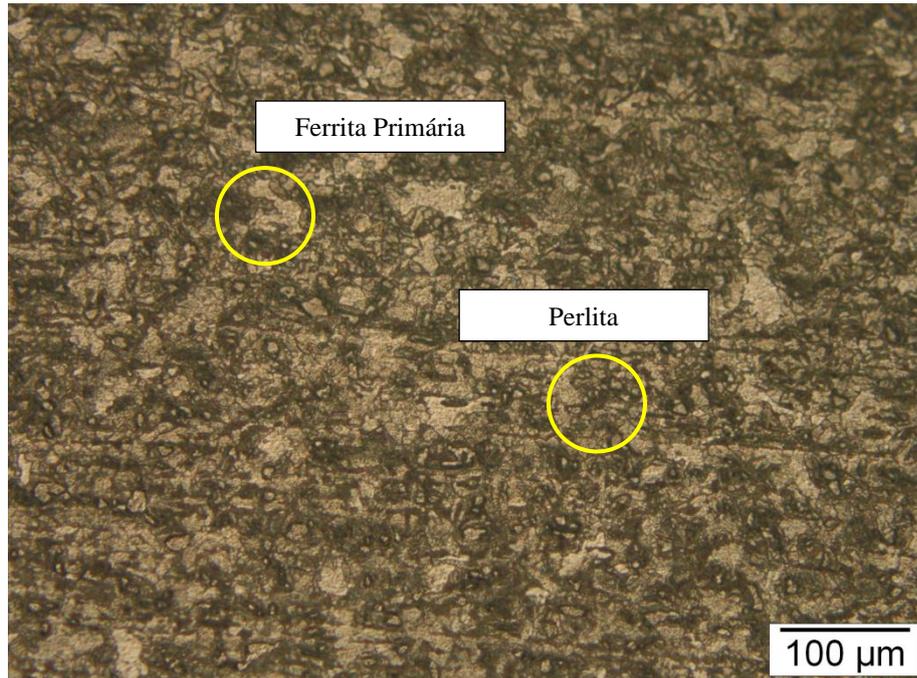
Nas micrografias obtidas das regiões da junta soldada (Metal de Base, Zona Termicamente Afetada e Zona Fundida) através de microscopia ótica com aumento de 200x é possível observar as microestruturas formadas nas regiões da junta soldada.

No Metal de Base (Figura 42) foi identificada a presença de uma microestrutura formada por ferrita primária e perlita. Estas microestruturas indicam que o material possui uma boa ductilidade e conseqüentemente boa tenacidade.

Na Zona Fundida (Figura 43) é possível observar uma microestrutura formada por ferrita com segunda fase e ferrita de contorno de grão.

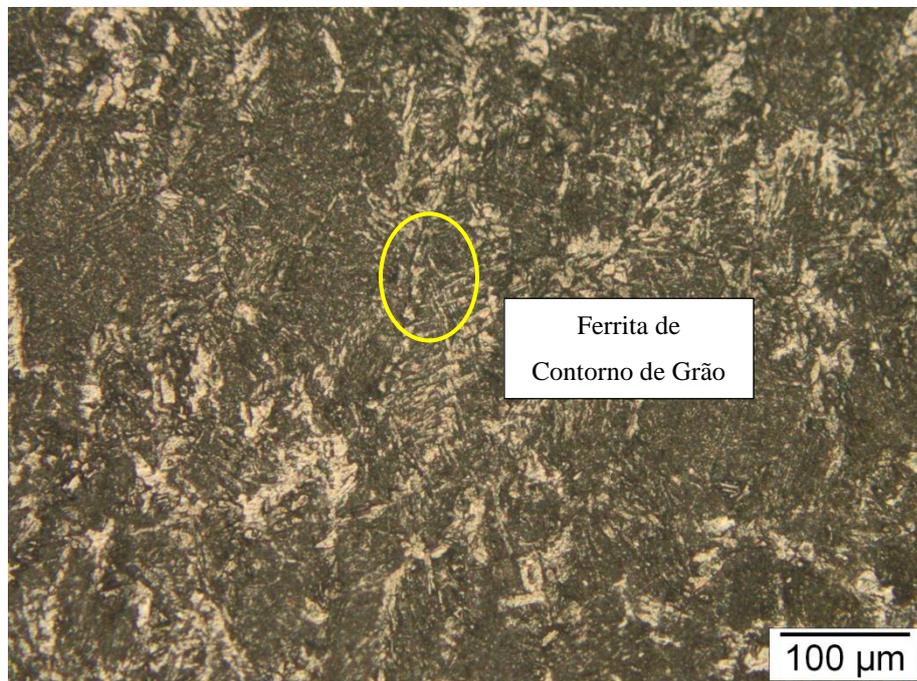
Na Zona Termicamente Afetada (Figura 44) foi identificado a presença de uma microestrutura formada por ferrita com segunda fase. Essa microestrutura tem como característica a não resistência a propagação de trincas e como conseqüência problemas com a tenacidade.

Figura 42 - Metal de Base 200x AC2



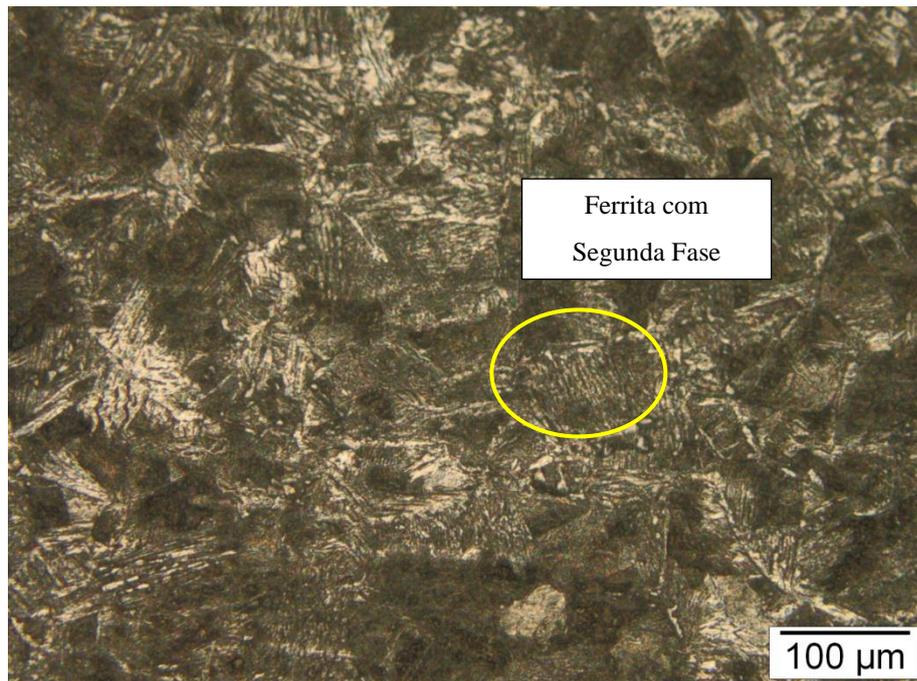
Fonte: Autor

Figura 43 - ZF 200x AC2



Fonte: Autor

Figura 44 - ZTA 200x AC2



Fonte: Autor

4.2.3 Junta Soldada Confeccionada com Vazão de Gás de 30 l/min e Utilização do Programa 12

Nas micrografias obtidas das regiões da junta soldada (Metal de Base, Zona Termicamente Afetada e Zona Fundida) através de microscopia ótica com aumento de 200x é possível observar as microestruturas formadas nas regiões da junta soldada.

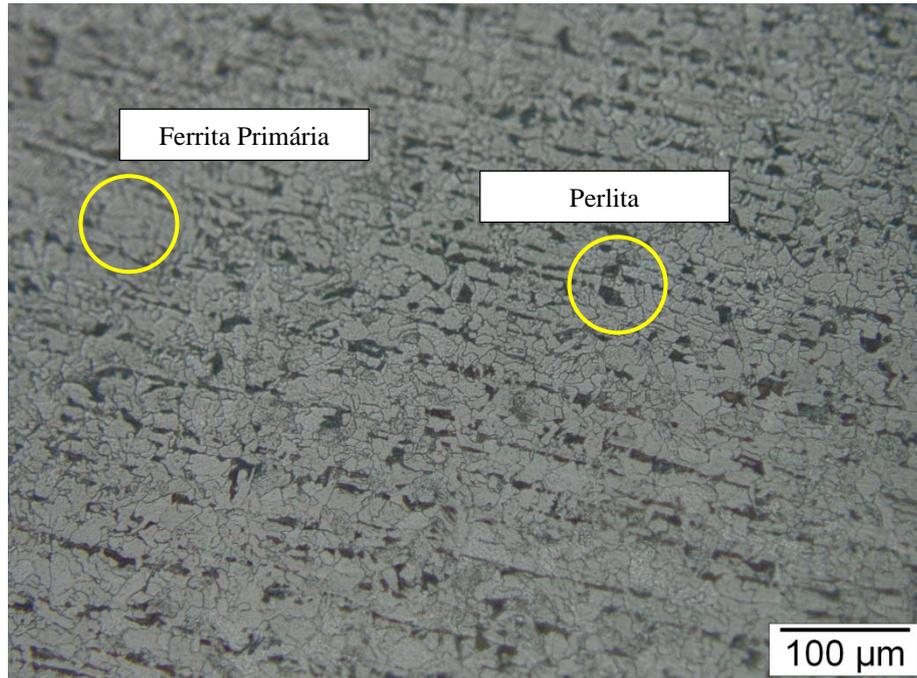
No Metal de Base (Figura 45) foi identificada a presença de uma microestrutura formada por ferrita primária e perlita. Estas microestruturas indicam que o material possui uma boa ductilidade e consequentemente boa tenacidade.

Na Zona Fundida (Figura 46) é possível observar uma microestrutura formada por ferrita primária assim como no metal de base, mas em tamanho menor o que resulta numa resistência superior ao metal de base e inferior ao da zona termicamente afetada.

Essa microestrutura tem como característica a não resistência a propagação de trincas e como consequência problemas com a tenacidade.

A partir da Figura 48 é possível observar a presença de um defeito ocasionado possivelmente por uma inclusão de escoria.

Figura 45 - Metal de Base 200x AP1



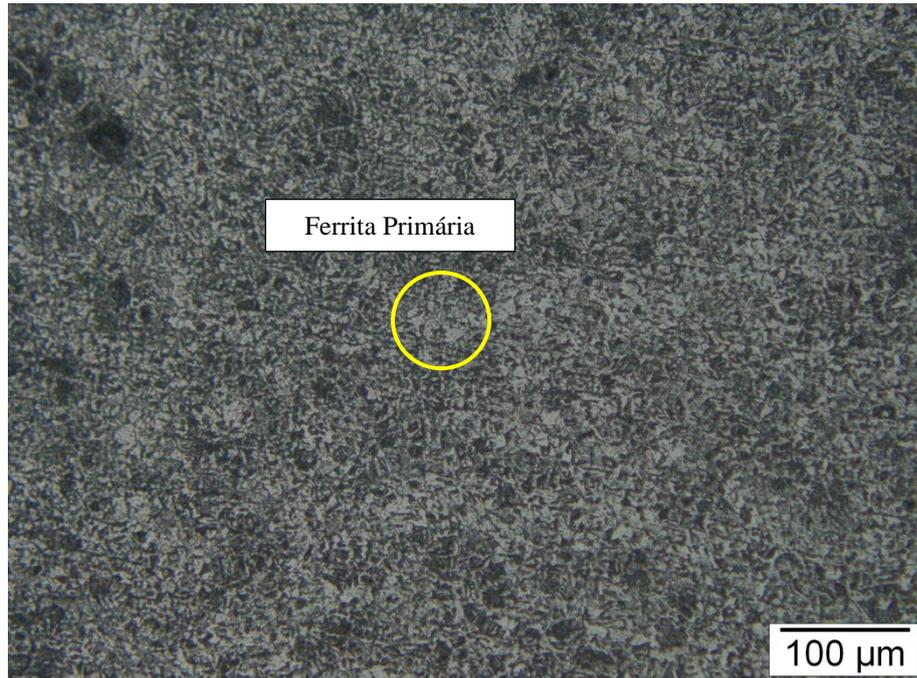
Fonte: Autor

Figura 46 - ZF 200x AP1



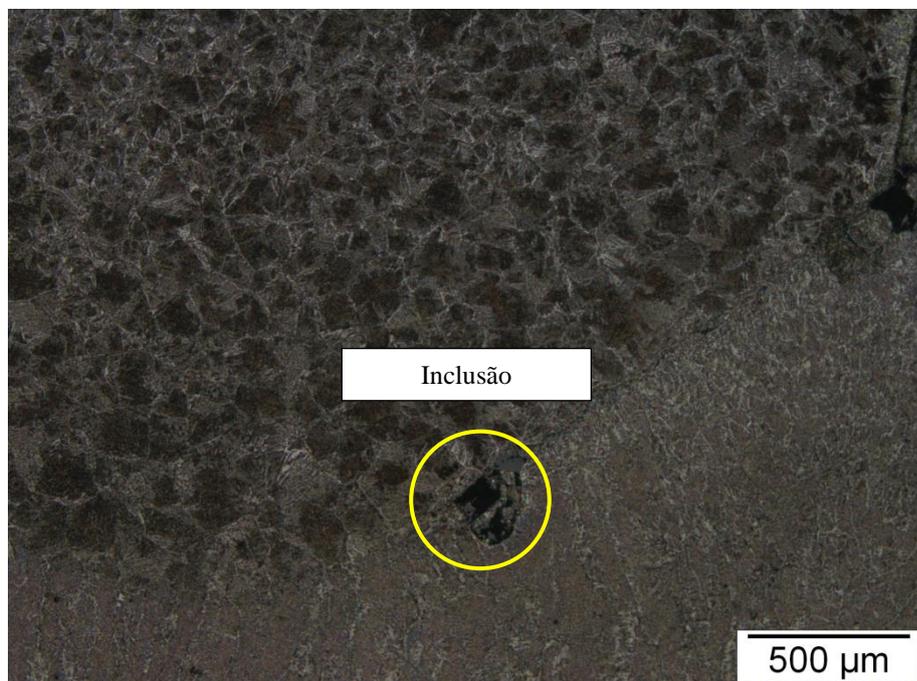
Fonte: Autor

Figura 47 - ZTA 200x AP1



Fonte: Autor

Figura 48 - Inclusão de escória na AP1



Fonte: Autor

4.2.4 Junta Soldada Confeccionada com Vazão de Gás de 15 l/min e Utilização do Programa 11

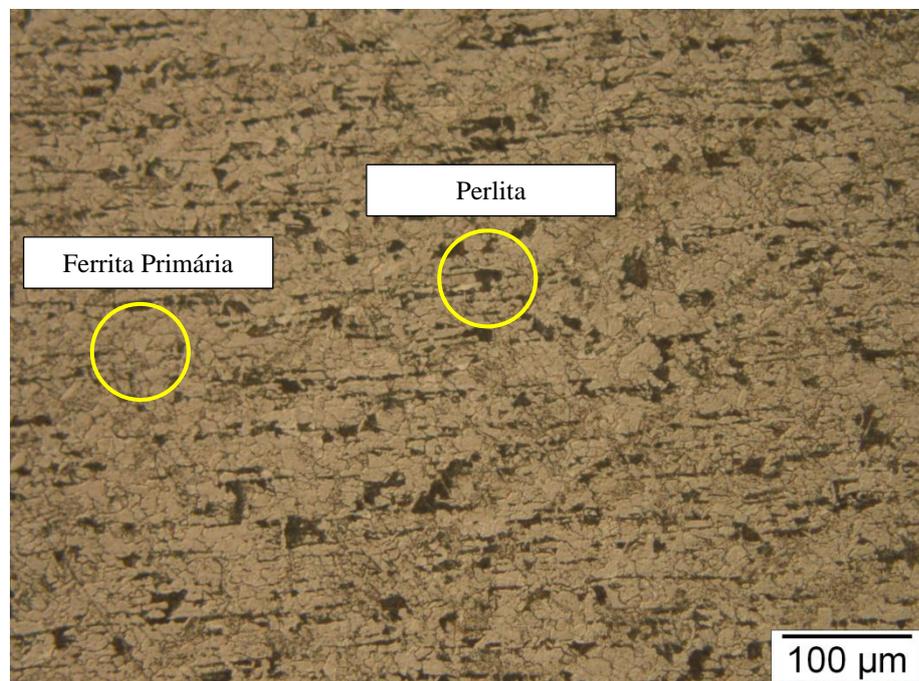
Nas micrografias obtidas das regiões da junta soldada (Metal de Base, Zona Termicamente Afetada e Zona Fundida) através de microscopia ótica com aumento de 200x é possível observar as microestruturas formadas nas regiões da junta soldada.

No Metal de Base (Figura 49) foi identificada a presença de uma microestrutura formada por ferrita primária e perlita. Estas microestruturas indicam que o material possui uma boa ductilidade e consequentemente boa tenacidade.

Na Zona Fundida (Figura 50) é possível observar uma microestrutura formada por ferrita com segunda fase e ferrita de contorno de grão.

Na Zona Termicamente Afetada (Figura 51) foi identificada a presença de uma microestrutura formada predominantemente por ferrita com segunda fase e ferrita de contorno de grão. Essa microestrutura tem como característica a não resistência a propagação de trincas e como consequência problemas com a tenacidade.

Figura 49 - Metal de Base 200x AC3



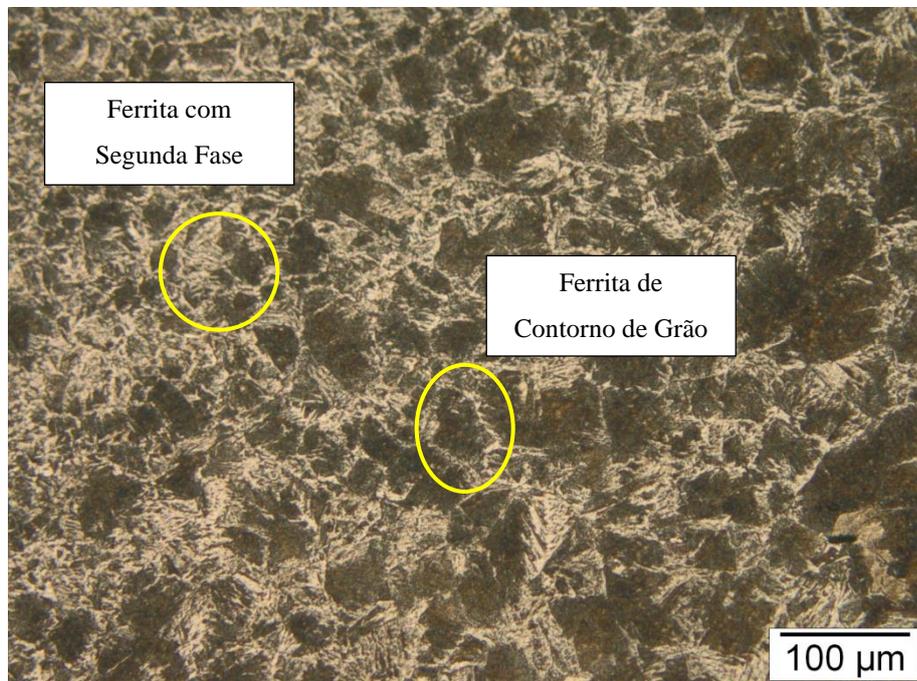
Fonte: Autor

Figura 50 - ZF 200x AC3



Fonte: Autor

Figura 51 - ZTA 200x AC3



Fonte: Autor

4.2.5 Junta Soldada Confeccionada com Vazão de Gás de 12 l/min e Utilização do Programa 11

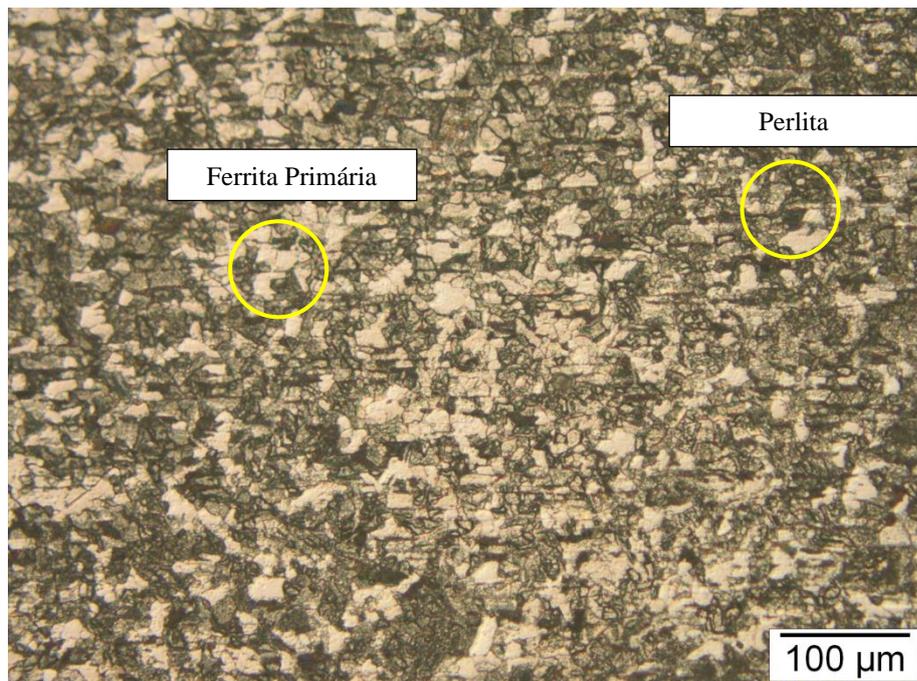
Nas Micrografias obtidas das regiões da junta soldada (Metal de Base, Zona Termicamente Afetada e Zona Fundida) através de microscopia ótica com aumento de 200x é possível observar as microestruturas formadas nas regiões da junta soldada.

No metal de base (Figura 52) foi identificada a presença de uma microestrutura formada por ferrita primária e perlita. Estas microestruturas indicam que o material possui uma boa ductilidade e consequentemente boa tenacidade.

Na Zona Fundida (Figura 53) é possível observar uma microestrutura formada por ferrita primária assim como no metal de base, mas em tamanho menor o que resulta numa resistência superior ao metal de base e inferior ao da zona termicamente afetada.

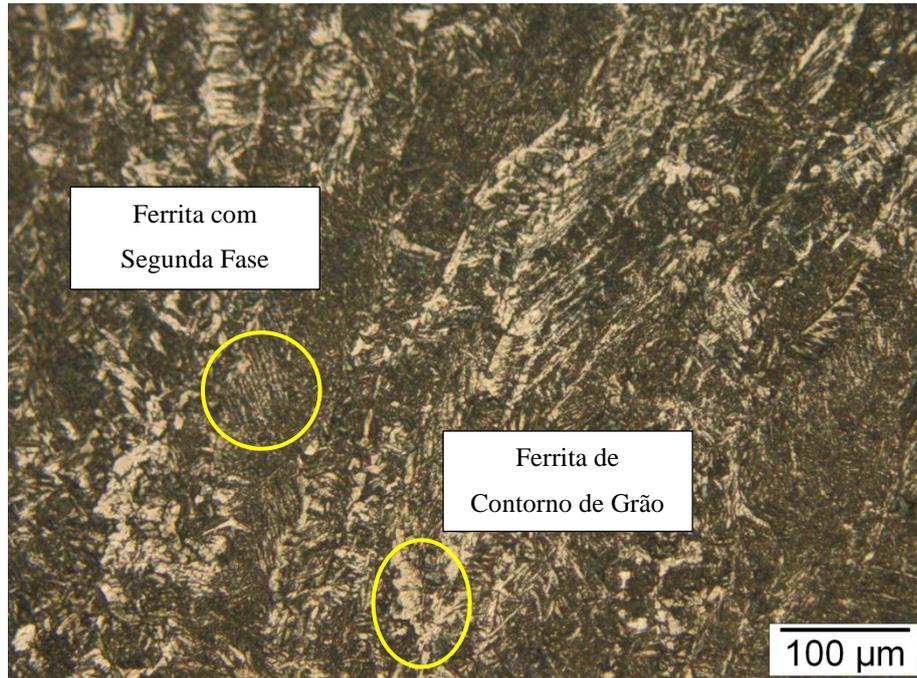
Na Zona Termicamente Afetada (Figura 54) foi identificada a presença de uma microestrutura formada por ferrita com segunda fase e uma pequena porção de ferrita de contorno de grão. Essa microestrutura tem como característica a não resistência a propagação de trincas e como consequência problemas com a tenacidade.

Figura 52 - Metal de Base 200x AC4



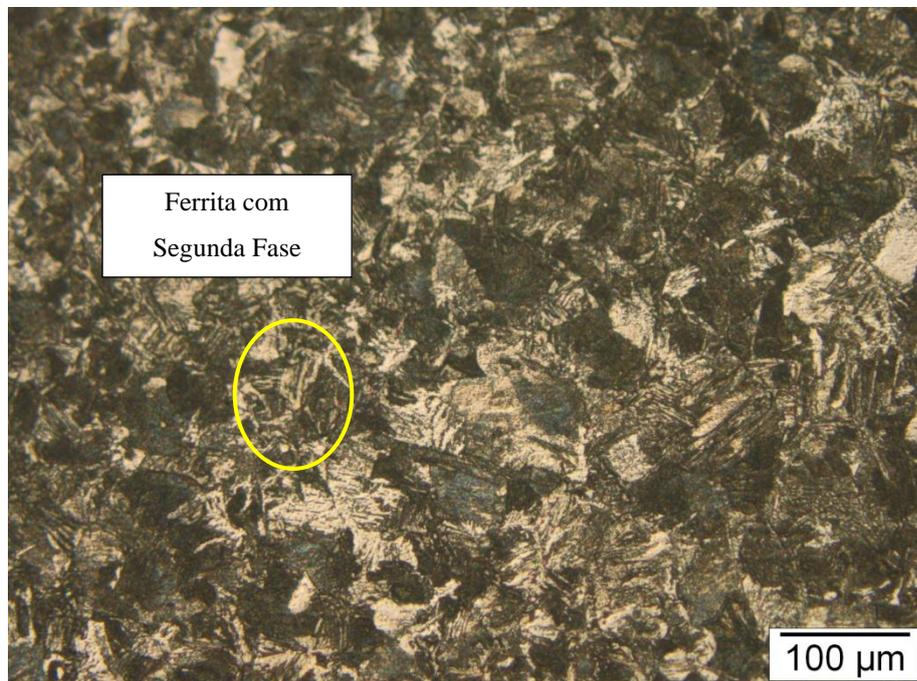
Fonte: Autor

Figura 53 - ZF 200x AC4



Fonte: Autor

Figura 54 - ZTA 200x AC4



Fonte: Autor

4.2.6 Junta Soldada Confeccionada com Vazão de Gás de 30 l/min e Utilização do Programa 11

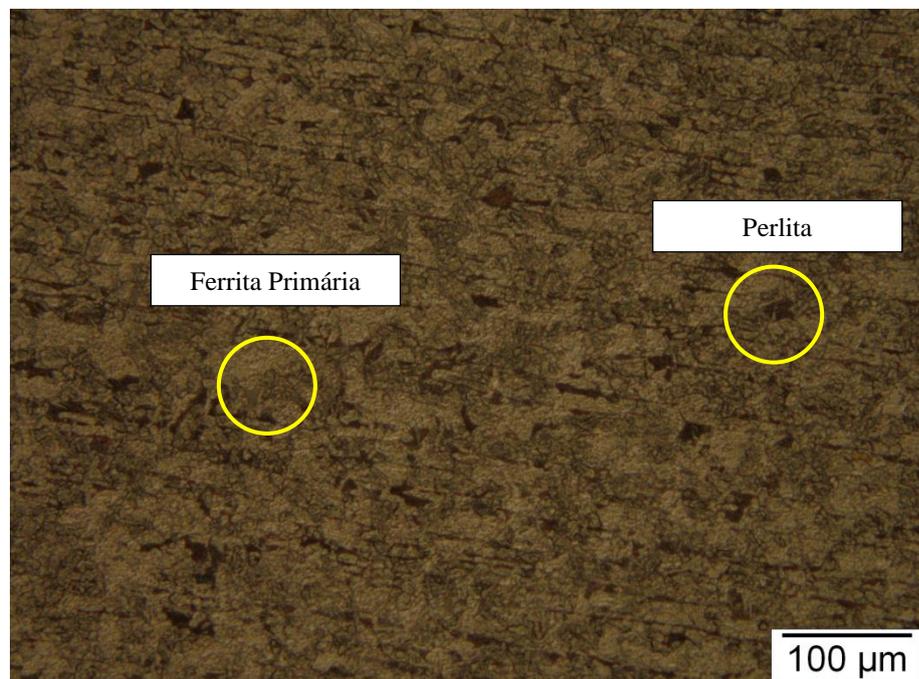
Nas Micrografias obtidas das regiões da junta soldada (Metal de Base, Zona Termicamente Afetada e Zona Fundida) através de microscopia ótica com aumento de 200x é possível observar as microestruturas formadas nas regiões da junta soldada.

No Metal de Base (Figura 55) foi identificada a presença de uma microestrutura formada por ferrita primária e perlita. Estas microestruturas indicam que o material possui uma boa ductilidade e consequentemente boa tenacidade.

Na Zona Fundida (Figura 56) é possível observar uma microestrutura formada por ferrita com segunda fase e ferrita de contorno de grão.

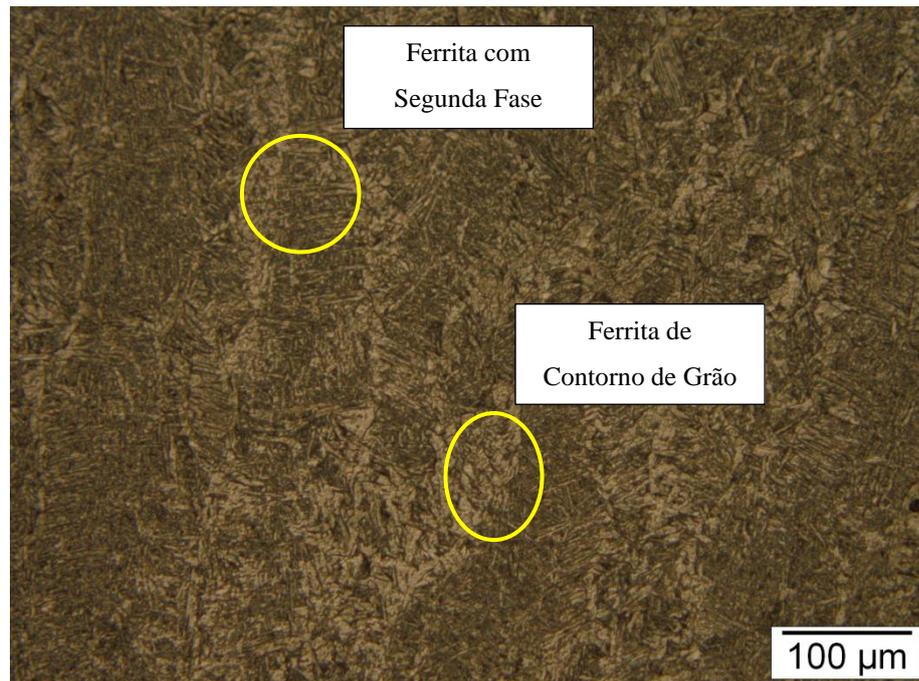
Na Zona Termicamente Afetada (Figura 57) foi identificada a presença de uma microestrutura formada por ferrita com segunda fase e ferrita de contorno de grão. Essa microestrutura tem como característica a não resistência a propagação de trincas e como consequência problemas com a tenacidade.

Figura 55 - Metal de Base 200x AP2



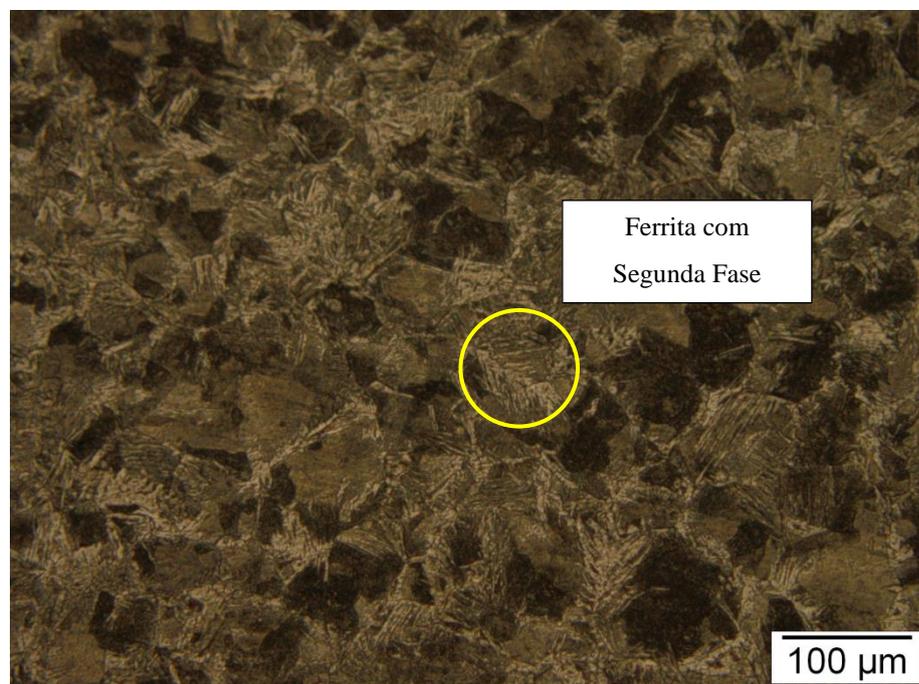
Fonte: Autor

Figura 56 - ZF 200x AP2



Fonte: Autor

Figura 57 - ZTA 200x AP2



Fonte: Autor

Com os resultados, podemos montar uma tabela para melhor visualização, de forma geral, das microestruturas encontradas em cada amostra e região de solda, de acordo com a Tabela 11.

Tabela 11 - Resumo das microestruturas encontradas

	AC1	AC2	AP1	AC3	AC4	AP2
MB	FP Perlita	FP Perlita	FP Perlita	FP Perlita	FP Perlita	FP Perlita
ZF	Bainita FSF FCG	FCG	FSF FCG	FSF FCG	FSF FCG	FSF FCG
ZTA	FSF FCG	FSF	FP	FSF FCG	FSF	FSF
DEFEITO		-	Inclusão	-	-	-

Fonte: Autor

Onde: FP = Ferrita Primária; FSF = Ferrita com Segunda Fase; FCG = Ferrita de Contorno de Grão.

4.3 Confeção de Caixas de Aço

Os itens 4.3.1 e 4.3.2 apresentam respectivamente a soldagem de caixa que motivou este estudo devido aos retrabalhos realizados devido a presença de defeitos tipo porosidade.

4.3.1 Confeção de Caixa Aço com vazão de gás de 30 l/min

Como padrão utilizado pela fábrica onde foi realizado o trabalho, as caixas de aço são produzidas utilizando-se os parâmetros como definido na amostra AP2 da Tabela 10, com vazão de 30 l/min. Começou a observar-se uma improdutividade no processo de solda, onde foi constatada uma alta taxa de retrabalho pro anomalias encontradas na solda. A Figura 58 exemplifica a ocorrência, onde podemos observar uma caixa de aço de modelo 51.0238, de chapa de aço com espessura de 1/4", com descontinuidade predominante de porosidade.

Figura 58 - Caixa de aço soldada com vazão de 30 l/min



Fonte: Autor

4.3.2 Confeção de Caixa Aço com vazão de gás de 15 l/min

Utilizando-se dos resultados obtidos do trabalho, as melhores condições descritas pela AC1 com vazão de 15 l/min foram implementadas no processo, tendo como resultado uma maior qualidade de solda, em um processo mais eficiente utilizando-se de uma redução de pelo menos metade do consumo de gás de proteção e, conseqüentemente, reduzindo-se o custo da utilização desta matéria-prima. A Figura 59 apresenta uma caixa de aço de modelo 51.0238 soldada de acordo com os parâmetros descritos em AC1 com vazão de 15 l/min logo após a soldagem e após o jateamento abrasivo, sem nenhuma descontinuidade.

Figura 59 - Caixa de aço soldada com vazão de 15 l/min antes e após jateamento



Fonte: Autor

5 CONCLUSÃO

A partir dos resultados obtidos nos ensaios foi possível observar a influência dos principais parâmetros de soldagem, variando-se a vazão do gás, e encontrar a melhor condição de soldagem e a pior em relação as juntas soldadas estudadas.

Observou-se a influência direta da velocidade da alimentação de arame definida pela seleção do programa de soldagem na máquina de solda, o qual para velocidades maiores tivemos uma solidificação mais rápida do metal depositado cobrindo maior parte da abertura superior, enquanto a velocidades inferiores tivemos uma maior penetração, o que já era esperado pelo fato de termos energia atuando por mais tempo na região.

O principal fator observado e tão importante quanto a velocidade de avanço, temos a utilização dos gases de proteção em vazões inferiores ao padrão que vinha sendo utilizado e que é apresentado nas amostras AP1 e AP2 com 30 l/min. Conseguimos ótimos resultados utilizando vazões de 15 l/min, não apresentando defeitos que prejudicariam a qualidade e produtividade do processo. Além disto, é um resultado que acarreta uma redução de 50% no consumo do gás de proteção e traz resultados eficientes. Como apresentado na seção 2.5, velocidades altas de vazão do gás podem agir de maneira inversa ao esperado, quando a vazão é alta o suficiente para que o fluxo atinja o regime turbulento e atue fazendo a sucção do ar para o interior do arco, possibilitando o surgimento de anomalias que elevam os custos do processo. Um exemplo disto ocorreu na amostra AP1, onde foi utilizada a vazão de 30 l/min e apresentou inclusão de escória em sua micrografia.

As amostras utilizando vazão de 12 l/min apresentaram também bons resultados, porém, trazem menos segurança quanto as influências externas que podem agir na contaminação do arco, como o ambiente onde ocorre o processo. Com isso, é preferível a utilização da vazão de 15 l/min vista a baixa variação de custo do processo entre ambas.

Feitas todas estas observações diante dos resultados apresentados, encontramos como melhor condição de soldagem os parâmetros encontrados na amostra AC1 da Tabela 10, utilizando vazão de 15 l/min e PGM 12. Estas condições devem substituir as condições atuais definidas pela amostra AP2 da mesma Tabela 10, com vazão de 30 l/min e PGM11.

REFERÊNCIAS

- AWS A5.18/A5.18M. **Specification for Carbon Steel Electrodes and Rods for Gas Shielded Arc Welding**. An America National Standard, 2005.
- BARBEDO, N. D. D. **Avaliação comparativa dos processos de soldagem GMAW e FCAW utilizando aço ASTM A-36 para verificar a soldabilidade, propriedades metalúrgicas e geométricas, e resistência mecânica**. Dissertação de Mestrado, Universidade Federal de Itajubá, outubro, 2011.
- BULL, S. (2000), **Welding Faults and Defects**, University of Newcastle upon Tyne, consultado em 20 de outubro de 2020.
- CARMINATI, F, A. **ESTUDO PRELIMILAR DA TENACIDADE AO IMPACTO NA SOLDA DE ALTA RESISTÊNCIA**. Dissertação de conclusão de curso, Universidade Federal do Espírito Santo, 2009.
- CHIAVERINI, V. **Tecnologia Mecânica: Processos de Fabricação e Tratamento**, Vol. 1, Ed. 2, São Paulo: McGraw-Hill, 1986.
- DUTRA, J. C. **Análise estatística de estabilidade de arco em soldagem MIG/MAG com transferência por curto-circuito**. In: Encontro Nacional de Tecnologia da Soldagem – ABS, 15, 1989, São Paulo. Anais. São Paulo: ABS, v.1, p.327-347, 1989.
- FARDIN, H. D; JUNIOR, M. R **Acompanhamento da Utilização e do Controle de Qualidade das Soldas na Construção e Montagem de Pontes Metálicas**. Dissertação de Conclusão de Curso (Especialista em Engenharia de Campo) – Universidade Federal do Espírito Santo, Vitória, 2009.
- FILHO, D. F. **Influência do Gás de Proteção na Soldagem MIG/MAG do Aço Inoxidável Ferrítico com Arames Ferríticos**. Dissertação de Conclusão de Curso (Mestrado em Engenharia Mecânica) – Universidade Federal de Uberlândia, Uberlândia, 2007.
- FILHO, E. G. M. **Estudo da Influência Relativa das Variáveis do Processo de Soldagem MIG-MAG (GMAW) no Passe de Raiz**. Dissertação de Conclusão de Curso (Mestrado em Engenharia dos Materiais) – CEFET, Belo Horizonte, 2012.
- FERRARESI, V. A.; FILHO, D. F.; BALSANO, P. S. S. **Influência do Gás de Proteção na Soldagem MIG/MAG na Qualidade do Cordão de Aço Inoxidável**. Dissertação de Conclusão de Curso (Mestrado em Engenharia Mecânica) – Universidade Federal de Uberlândia, Uberlândia, 2007.
- FORTES C. **Apostila de Eletrodos Revestidos**. ESAB BR, 2005. Disponível em: <https://www.esab.com.br/br/pt/education/apostilas/index.cfm>. Acesso em 26 de setembro de 2020.
- FORTES, C. **Soldagem MIG/MAG**. ESAB BR, 2005. Disponível em: <https://www.esab.com.br/br/pt/education/apostilas/index.cfm>. Acesso em 25 de setembro de 2020.

GUEDES, R. P. **Influência da corrente de soldagem nas propriedades de juntas de aço de alta resistência e baixa liga soldadas com eletrodo revestido.** Dissertação de Mestrado (Mestrado em Engenharia Mecânica), Universidade Federal de Pernambuco, Recife, 2009.

HUALLPA, E. A. **Caracterização da Transformação Martensítica em Temperaturas Criogênicas.** Dissertação de Mestrado (Mestrado em Engenharia), Escola Politécnica da Universidade de São Paulo, São Paulo, 2011.

LÉLIS, J. D. L. **Influência do Ajuste Fino do Comprimento de Arco Elétrico e da DBCP sobre o Perfil do Cordão em Soldagem Vertical em Junta Sobreposta Tipo Tampão.** Monografia (Especialista em Engenharia de Soldagem), Universidade Federal do Paraná, Curitiba, 2013.

LIMA JÚNIOR, D. R. **Caracterização Microestrutural e Mecânica de Juntas Soldadas Utilizando os Processos GTAW, FCAW e SMAW.** Dissertação de Mestrado (Mestrado em Engenharia Mecânica), Universidade Federal de Pernambuco, Recife, 2013.

MACHADO, I. **Soldagem e Técnicas Conexas: Processos.** Editado pelo autor, Ed. 1. 477p, 1996.

MARQUES, P; MODENESI, P; BRACARENSE, A. **Soldagem: Fundamentos e Tecnologia,** Ed. 3, Belo Horizonte: Editora UFMG, 2009. 363p.

MATTHEWS, C. [ASME engineer's data book](#), ISBN 978-0-7918-0155-0, ASME Press, p. 211, 2001.

MENDES, M. J. M. **Optimização e estudo dos parâmetros de soldadura MAG Robotizada de uma estrutura tubular de aço S235 com o fio consumível G3Si1.** Dissertação de Mestrado, Faculdade de Engenharia da Universidade de Porto, 2009.

MODENESI, Paulo. **Descontinuidades e Inspeção em Juntas Soldadas.** Departamento de Engenharia de Metalurgia de Materiais, 2001. Disponível em: <https://foundrygate.com/upload/artigos/Descontinuidades%20e%20Inspe%C3%A7%C3%A3o%20de%20Juntas%20Soldadas.pdf>. Acesso em 29 de outubro de 2020.

MODONESI, P. **Soldabilidade de Algumas Ligas Metálicas,** Departamento de Engenharia de Metalurgia de Materiais, 2011. Disponível em: <https://demet.eng.ufmg.br/wp-content/uploads/2012/10/soldabilidade.pdf>. Acesso em: 30/05/2021.

MODONESI, P. **Soldabilidade dos Aços Transformáveis,** Departamento de Engenharia de Metalurgia de Materiais, 2012. Disponível em: <https://demet.eng.ufmg.br/wp-content/uploads/2012/10/metferritic1.pdf>. Acesso em: 30/05/2021.

OKUMURA, T; TANIGUCHI, C. **Engenharia de Soldagem e Aplicações.** São Paulo: LTC, 1982.

SCOTTI, A., PONOMAREV, V. **Soldagem MIG-MAG.** São Paulo. Artliber Editora. 284 p, 2008.

SOLCI, A. M. **Soldagem ao arco elétrico sob proteção gasosa**. White Martins Gases Industriais S/A, Bauru, 2015. Disponível em: <http://www.soldaautomatica.com.br>. Acesso em: 05/06/2021.

SOUZA, C. I. **Análise comparativa dos processos de soldagem GMAW e FCAW com transferência metálica por curto-circuito na posição horizontal**. Dissertação de Mestrado, Universidade Federal de Uberlândia, 2011.

SOUZA, DANIEL; VILARINHO, L.O. **Influência da regulagem de parâmetros de soldagem sobre a estabilidade do processo MIG/MAG operando em curto-circuito**. Revista Soldagem e Inspeção, São Paulo, p. 022-031, 2011.

STENBACKA, N; PERSSON, K. **Shielding Gases for Gas Metal Arc Welding**. Welding Journal. Nov., 1989.

VENSON, I. **Constituintes Estruturais de Equilíbrio do Aço**. Departamento de Engenharia Florestal, UFPR. 2009.

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

WEMAN, K. **Welding Processes Handbook**. Ed. 2. Elsevier. 208 p, 2003.