

UNIVERSIDADE TECNOLÓGICA FEDERAL DO PARANÁ
ENGENHARIA MECÂNICA

PEDRO PERES CARDIM

**INFLUÊNCIA DOS PARÂMETROS DE SOLDAGEM DE REVESTIMENTO COM
AÇO INOX 308L**

TRABALHO DE CONCLUSÃO DE CURSO

CORNÉLIO PROCÓPIO
2018

PEDRO PERES CARDIM

**INFLUÊNCIA DOS PARÂMETROS DE SOLDAGEM DE REVESTIMENTO COM
AÇO INOX 308L**

Trabalho de Conclusão de Curso de graduação, apresentado à disciplina Trabalho de Conclusão de Curso 2, do curso de Engenharia Mecânica da Universidade Tecnológica Federal do Paraná – UTFPR, como requisito parcial para a obtenção do título de Bacharel em Engenharia Mecânica.

Orientador: Prof. Dr. Celso Alves Correa

CORNÉLIO PROCÓPIO
2018



**Universidade Tecnológica Federal do Paraná
Campus Cornélio Procópio
Departamento Acadêmico de Mecânica
Curso de Engenharia Mecânica**



FOLHA DE APROVAÇÃO

Pedro Peres Cardim

INFLUÊNCIA DOS PARÂMETROS DE SOLDAGEM DE REVESTIMENTO COM AÇO INOX 308L

Trabalho de conclusão de curso apresentado às 10:00 horas do dia 07/12/2018 como requisito parcial para a obtenção do título de Engenheira Mecânica no programa de Graduação em Engenharia Mecânica da Universidade Tecnológica Federal do Paraná. O candidato foi arguido pela Banca Avaliadora composta pelos professores abaixo assinados. Após deliberação, a Banca Avaliadora considerou o trabalho aprovado.

Prof. Dr. Celso Alves Correa - (Orientador)

Prof. Dr. Paulo Cezar Moselli - (Membro)

Prof^a. Dr^a. Emillyn Ferreira Trevisani Olivio - (Membro)

“A folha de aprovação assinada encontra-se na coordenação do curso”

AGRADECIMENTOS

Aos meus pais, Carlos Alberto Cardim e Elianne Maria de Moraes Peres Cardim por todo o apoio e suporte ao longo de todos esses anos e à minha irmã Ana Luiza Peres Cardim por todo incentivo e carinho.

À todos meus familiares, pela educação e pelos exemplos de vida e de seres humanos.

Agradeço ao professor Dr. Celso Alves Corrêa pela sugestão, orientação e ajuda nos momentos importantes do trabalho.

À banca avaliadora pelo tempo reservado para este trabalho.

A todos os meus amigos de curso, de faculdade e de vida, que direta ou indiretamente contribuíram para a realização deste trabalho.

Por fim, à Universidade Tecnológica Federal do Paraná – Campus Cornélio Procópio com todo seu corpo docente e colaboradores pela estrutura e apoio que me concederam.

RESUMO

CARDIM, Pedro Peres. **INFLUÊNCIA DOS PARÂMETROS DE SOLDAGEM DE REVESTIMENTO COM AÇO INOX 308L**. 2018. 37f. Trabalho de Conclusão de Curso (Graduação) – Engenharia Mecânica. Universidade Tecnológica Federal do Paraná. Cornélio Procópio, 2018.

A soldagem de revestimento com aço inox vem sendo amplamente utilizada na indústria, pois permite a criação de superfícies com características anticorrosivas sobre materiais de baixo custo como aço carbono e aços de baixa liga. Porém, para garantir a qualidade do revestimento, o processo de soldagem deve estar corretamente regulado, assim obtendo-se a geometria de cordão de solda desejada e apresentando uma boa produtividade. Neste trabalho foi feito um estudo comparativo da influência da velocidade de soldagem e da distância entre o eletrodo e a peça sobre a morfologia dos cordões de solda, sendo analisados como variáveis de resposta a largura, o reforço e a penetração dos cordões. Foi utilizado o processo MIG, frequentemente empregado na soldagem de revestimento e facilmente automatizado, para a deposição de aço inoxidável ABNT 308L sobre corpos de prova de aço ABNT 1020. A maior largura e o maior reforço foram obtidos com velocidade de soldagem de 250 mm/min e distância bico de contato peça de 20 mm. A menor penetração foi obtida com 300 mm/min de velocidade de soldagem e distância bico de contato peça de 25 mm.

Palavras-chave: Soldagem de revestimento. MIG/MAG. Morfologia do cordão. Revestimento de aços carbono com aços inoxidáveis. Aço inoxidável 308L.

ABSTRACT

CARDIM, Pedro Peres. **Influence of welding parameters on cladding with stainless steel 308L**. 2018. 37f. Course Completion Work (Undergraduate) - Mechanical Engineering. Federal Technological University of Paraná. Cornélio Procopio, 2018.

Stainless steel cladding has been widely used in industry since it allows the creation of anticorrosive surfaces on low cost materials such as carbon steel and low alloy steels. However, to ensure the quality of the coating, the welding processes must be properly regulated, therefore obtaining the desired weld bead geometry and presenting good productivity. In this paper, a comparative study of the influence of the welding speed and the distance between the electrode and the part on the morphology of the weld beads was analyzed. The variables of response were width, reinforcement and penetration of the beads. The MIG process, frequently used in coating welding and easily automated, was used for the deposition of ABNT 308L stainless steel on ABNT 1020 steel samples. The bigger width and reinforcement were obtained with 250 mm/min welding speed and with a 20 mm distance between the electrode and the part. The smaller penetration was obtained with 300 mm/min welding speed and with a 25 mm distance between the electrode and the part.

Keywords: Cladding. MIG/MAG. Bead geometry. Stainless steel cladding. Stainless steel 308L.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 - Processo básico de soldagem MIG/MAG	13
Figura 2- Equipamento para soldagem MIG/MAG	14
Figura 3 - Tocha MIG/MAG	14
Figura 4 - Efeito da adição do oxigênio ao argônio	16
Figura 5 - Características de queima ER70S-3	17
Figura 6 - Distância entre o bico de contato e a peça	18
Figura 7 - Efeito da extensão do eletrodo nas características do cordão de solda ...	18
Figura 8 - Relação Tensão do arco x Corrente	19
Figura 9 - Efeitos dos parâmetros sobre a penetração	20
Figura 10 - Efeitos dos parâmetros sobre o reforço	21
Figura 11 - Efeito dos parâmetros sobre a largura	21
Figura 12 - Ângulos de orientação da tocha.....	22
Figura 13 - Soldagem puxando e empurrando	22
Figura 14 - Efeito da corrente de soldagem na penetração da solda – aço carbono, curto-circuito, Ar-25%CO2.....	23
Figura 15 - Efeito da tensão de soldagem na penetração da solda – alumínio, aerossol, argônio	24
Figura 16 - Efeito da velocidade de soldagem na penetração da solda – alumínio, aerossol, argônio.....	25
Figura 17 - Efeito da posição longitudinal da tocha na penetração da solda	26
Figura 18 - Efeito da extensão do eletrodo na taxa de deposição	27
Figura 19 - Perfil geométrico desejado do cordão de solda: a) união da junta soldada (aplicações convencionais); b) soldagem de revestimento	29
Figura 20 - Influência dos parâmetros sobre a largura.....	35
Figura 21 – Influências dos parâmetros sobre o reforço	36
Figura 22 - Influência dos parâmetros sobre a penetração	37

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 - Ajustes nos parâmetros e técnicas de soldagem	28
Tabela 2 - Eletrodos de aços inoxidáveis	31
Tabela 3 - Ensaios e variáveis de entrada	33
Tabela 4 - Resultados	34
Tabela 5 - Médias e desvio padrão.	34

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO	10
2	OBJETIVOS	11
2.1	OBJETIVOS ESPECÍFICOS	11
3	FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA	12
3.1	PROCESSO DE SOLDAGEM	12
3.1.1	Processo de soldagem MIG/MAG	12
3.1.2	Parâmetros de soldagem	16
3.1.3	Características do cordão de solda	23
3.1.4	Soldagem de revestimento.....	28
3.1.5	Soldagem de revestimento de aços carbono com aços inoxidáveis	30
4	METODOLOGIA	32
4.1	EQUIPAMENTOS E PARÂMETROS	32
4.2	REALIZAÇÃO DOS EXPERIMENTOS.....	32
5	RESULTADOS E DISCUSSÕES	34
5.1	LARGURA	35
5.2	REFORÇO.....	36
5.3	PENETRAÇÃO.....	36
6	CONCLUSÕES	38
7	REFERÊNCIAS	39

1 INTRODUÇÃO

O processo de soldagem em geral é amplamente empregado nos processos de fabricação. Nos mais diversos ambientes industriais a soldagem permite a união de materiais para a fabricação desde estruturas mais simples até equipamentos mais complexos.

O processo MIG/MAG, bastante estudado e com literatura de fácil acesso, foi introduzido no mercado na década de 40 com o intuito de aumentar a produtividade dos processos de fabricação com soldagem. Nos países industrializados já era o processo de união de materiais mais utilizado na década de 90. (GROETELAARS, 2005)

Como principal processo de união permanente de peças metálicas, a soldagem permite a montagem de conjuntos com rapidez, segurança e economia de material. Porém, apesar de ser usualmente considerada um processo de união, observa-se que o processo de soldagem vem sendo utilizado para recuperar peças com desgaste ou para criar revestimentos com superfícies especiais, este tipo de soldagem se denomina soldagem de revestimento.

A criação de uma superfície com características especiais como resistência a corrosão a partir da deposição de um material sobre o outro tem tido um crescente interesse em vários tipos de indústrias, interesse justificado pelo fato de que revestimentos com propriedades e dimensões desejadas podem ser produzidos de forma rápida e econômica.

Os aços inoxidáveis se mostram como os materiais com as características mais frequentemente desejadas para revestimentos. Geralmente depositados sobre superfícies de aço carbono ou de aços de baixa liga, produzem uma camada com propriedades anticorrosivas e com resistência suficiente para suportar ambientes sujeitos a altos desgastes por corrosão. Essa aplicação se mostra bastante atrativa pois possibilita a fabricação de peças com características especiais com um menor custo, visto que o aço carbono tem um custo muito menor comparado ao emprego de peças puramente de aços inoxidáveis.

Diversos processos de soldagem podem ser empregados na deposição de aços inoxidáveis sobre aços carbono, dentre eles o processo MIG/MAG possui uma grande aplicabilidade por apresentar uma boa taxa de deposição, boa estabilidade de arco, facilidade de operação, entre outras características.

2 OBJETIVOS

O objetivo deste trabalho constitui-se de otimizar o processo de soldagem MIG/MAG para a soldagem de revestimento do aço ABNT 1020 com aço inoxidável ABNT 308L, visando encontrar a melhor combinação entre os parâmetros analisados, que foram velocidade de soldagem e distância entre eletrodo e peça, para se obter uma maximização das características geométricas do cordão de solda desejadas, dessa forma aumentando a produtividade e eficiência do processo.

2.1 OBJETIVOS ESPECÍFICOS

O projeto se desenvolvera a partir da soldagem de corpos de prova, alternando as variáveis de influência e estudando as variáveis de resposta, visando:

- Maximização da largura do cordão
- Maximização do reforço
- Minimização da penetração
- Garantia de um cordão de revestimento isento de defeitos e com pequenas falhas de recobrimento da escória

3 FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA

Este capítulo tem por interesse apresentar de forma sucinta todos os conceitos abordados para a elaboração deste projeto, englobando conceitos de soldagem, MIG/MAG, parâmetros de soldagem, soldagem de revestimento e soldagem de aço inoxidável 308L.

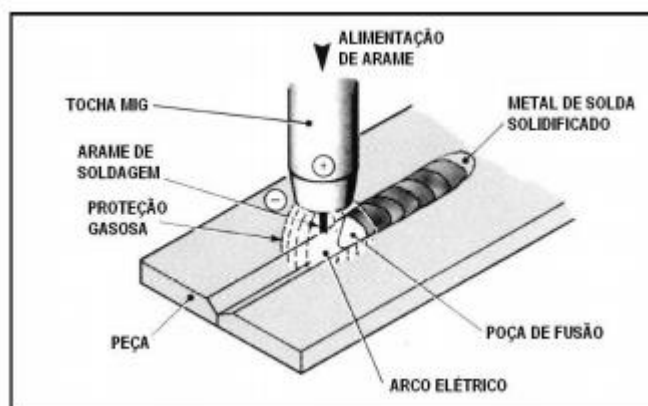
3.1 PROCESSO DE SOLDAGEM

O processo de soldagem pode ser definido como a união de dois matérias, podendo ser iguais ou diferentes, por meio da fusão dos mesmos. Com ou sem adição de materiais, usando uma fonte de calor. Porém, existem variações dos processos de soldagem que buscam a deposição de um material sobre uma superfície formando um revestimento com características especiais. Segundo a AWS – American Welding Society, o termo soldagem pode ser definido como: “Operação que visa obter a coalescência localizada produzida pelo aquecimento até uma temperatura adequada, com ou sem adição de pressão e de metal de adição.” (MARQUES e MODENESI, 2000)

3.1.1 Processo de soldagem MIG/MAG

O processo de soldagem a arco com proteção por gás e eletrodo consumível consiste na formação de um arco elétrico entre a peça e o eletrodo nu consumível, que é alimentado continuamente. Um gás inerte ou ‘ativo’ flui pelo bocal, protegendo assim a poça de fusão. Geralmente se usa argônio e hélio como gases inertes, e como gases oxidantes pode-se usar CO₂ ou argônio + CO₂. Também denominado GMAW (Gas Metal Arc Welding), no Brasil é amplamente conhecido MIG ou MAG (“Metal Inert Gas”, ou, “Metal Active Gas”, respectivamente). (MACHADO, 1996)

Figura 1 - Processo básico de soldagem MIG/MAG



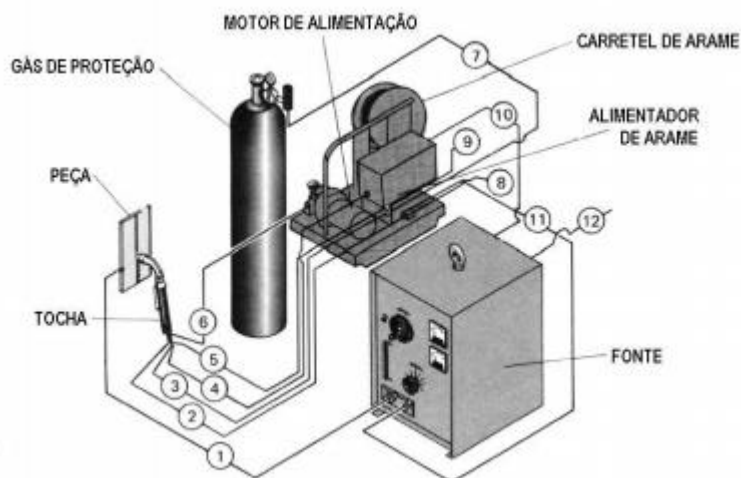
Fonte: (ESAB, 2005)

O processo MIG/MAG é amplamente empregado nas indústrias, possui excelentes características para a robotização. Pode ser de modo automático ou semiautomático. Algumas das principais características que justificam essa alta empregabilidade são:

- Pode ser soldado em todas as posições.
- Ótima estabilidade do arco.
- Não há necessidade de remoção de escória.
- Metal depositado com baixa concentração de hidrogênio.
- Maior taxa de deposição quando comparado com eletrodo revestido.
- Facilidade de operação.
- Soldagem de todos os metais e ligas comerciais.

Conforme mostra a Figura 2, o equipamento para soldagem MIG/MAG consistem em uma fonte de energia, quase sempre com polaridade reversa (CC+), o polo positivo é conectado à tocha e o polo negativo à peça. Um alimentador de arame, que tem como função puxar o arame do carretel e alimenta-lo ao arco, a uma velocidade constante, uma tocha, expandida na Figura 3, um suprimento de gás protetor com regulagem de pressão e, no caso da tocha refrigerada a água, um sistema de refrigeração.

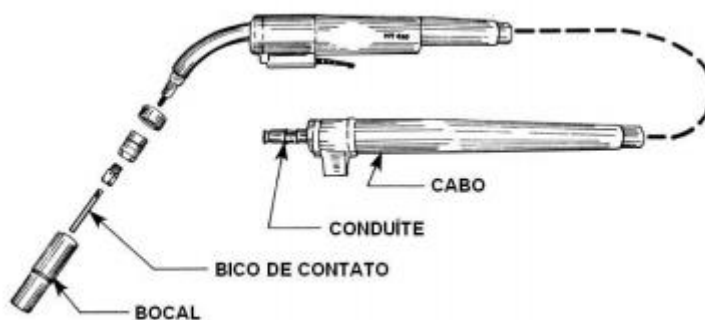
Figura 2- Equipamento para soldagem MIG/MAG



Fonte: (ESAB, 2005)

1. Cabo de solda (negativo)
2. Refrigeração da tocha (água)
3. Gás de proteção
4. Gatilho da tocha
5. Água de refrigeração para a tocha
6. Conduíte do arame
7. Gás de proteção vindo do cilindro
8. Saída de água de refrigeração
9. Entrada de água de refrigeração
10. Entrada de 42 V (CA)
11. Cabo de solda (positivo)
12. Conexão para a fonte primária (220/380/440 V)

Figura 3 - Tocha MIG/MAG



Fonte: (ESAB, 2005)

O bico de contato é responsável por conduzir a energia de soldagem até o arame e também por dirigir o arame até a peça, fabricado em cobre, é uma peça de reposição, pois seu diâmetro interno é importante para alimentar facilmente o arame e ao mesmo tempo ter um bom contato elétrico. Deve ser firmemente preso à tocha e centrado no bocal, que por sua vez, direciona o fluxo de gás até a região de soldagem.

3.1.1.1 Gases de proteção

O ar atmosférico é expulso da zona de soldagem por um gás, evitando assim a contaminação da poça de fusão por, principalmente, nitrogênio, oxigênio e vapor de água presentes na atmosfera.

O nitrogênio reduz a ductilidade e a tenacidade do aço solidificado, podendo causar fissurações e porosidade. O excesso de oxigênio no aço forma monóxidos de carbono que podem ser presos no material e causar também porosidade. Igualmente prejudicial, o hidrogênio presente nas moléculas de água acarreta em porosidades e fissurações sob o cordão no metal de solda.

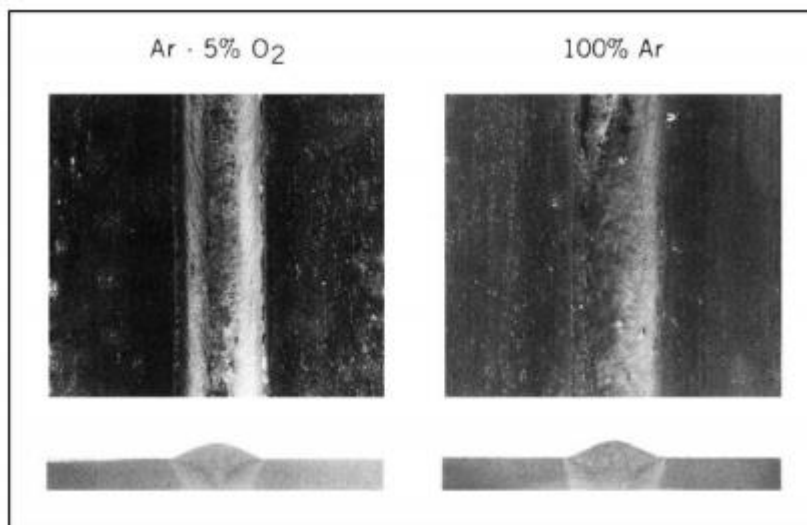
Três gases principais são usados como proteção para evitar esses problemas associados à contaminação da poça de fusão: Argônio(Ar), hélio (He) e dióxido de carbono (CO₂). Pequenas quantidades de oxigênio (O₂), nitrogênio (N₂) e hidrogênio (H₂) se provaram úteis em algumas situações.

O argônio e o hélio são gases inertes, não se combinam com outros elementos. Já os outros gases, possuem uma tendência à oxidação, compensada pelas formulações especiais dos eletrodos. (ESAB, 2005)

3.1.1.2 Argônio

O Argônio é um gás inerte utilizado tanto puro quanto com combinações de outros gases para se obter as características do arco e de soldagem desejadas. Pode ser empregado em quase todos os processos de soldagem para alcançar boa soldabilidade, propriedades mecânicas, estabilidade do arco e produtividade. Usualmente é empregado puro na soldagem de metais não ferrosos. Na soldagem de metais ferrosos é normalmente misturado a outros gases como oxigênio, hélio, hidrogênio, ou dióxido de carbono. (ESAB, 2005)

Figura 4 - Efeito da adição do oxigênio ao argônio



Fonte: (ESAB, 2005)

O argônio é um excelente condutor de corrente e possui uma boa estabilidade de arco graças ao seu baixo potencial de ionização. O argônio produz uma coluna de arco restrita a uma alta densidade de corrente concentrando a energia em uma pequena área. O resultado é um perfil com boa penetração e no formato de um dedo. (ESAB, 2005)

3.1.2 Parâmetros de soldagem

Os denominados “parâmetros de soldagem” são as variáveis ajustáveis que exercem grande influência sobre a geometria do cordão, propriedades mecânicas, defeitos operacionais e estabilidade do arco. Os principais parâmetros são a intensidade de corrente, tensão, velocidade de soldagem e ângulo da tocha. (MACHADO, 1996)

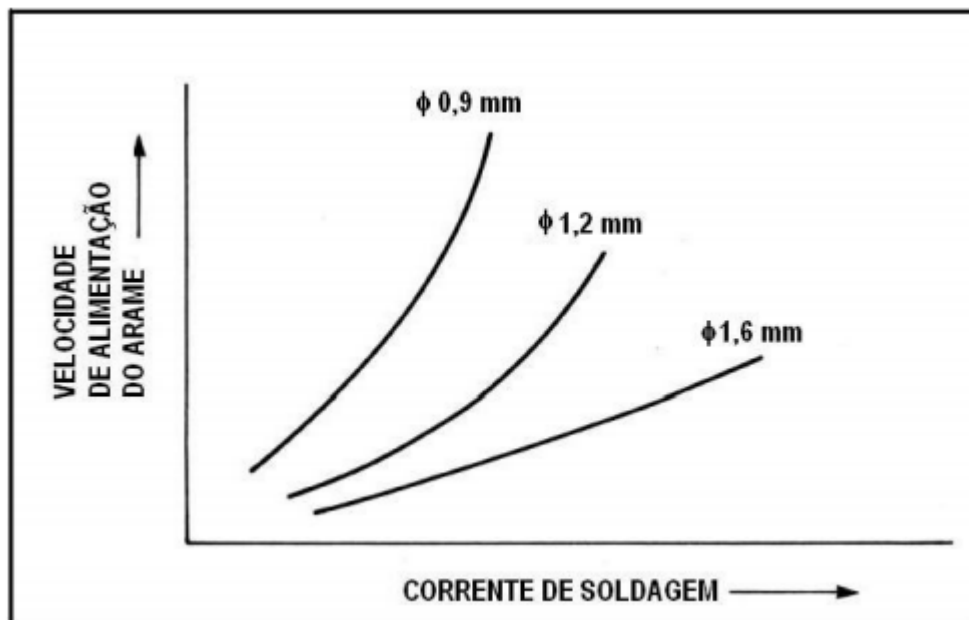
3.1.2.1 Corrente

A intensidade de corrente é o parâmetro com maior influência sobre a taxa de deposição, modo de transferência, penetração e reforço. É a amperagem de saída da fonte quando a solda está sendo realizada.

Na soldagem MIG/MAG a corrente é diretamente proporcional à velocidade de alimentação do arame, ou seja, um aumento ou diminuição na velocidade do arame causará um aumento ou diminuição na corrente de soldagem. Essa relação entre a

corrente e a velocidade do arame é denominada característica de queima. O diâmetro do arame também está diretamente relacionado à corrente, conforme mostra a Figura 05.

Figura 5 - Características de queima ER70S-3



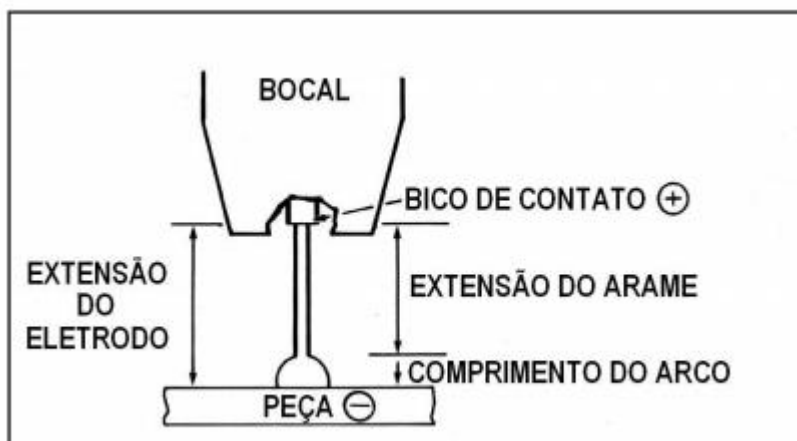
Fonte: (ESAB, 2005)

Cada eletrodo tem uma característica de queima específica e pode-se notar que em baixas correntes a variação do gráfico é praticamente linear e para altas correntes, principalmente em diâmetros menores, o gráfico passa a ser não linear, devido ao aquecimento pela resistência à passagem da corrente elétrica na extensão do eletrodo, conhecido por efeito Joule (I^2R). (ESAB, 2005)

3.1.2.2 Extensão do eletrodo

A extensão do eletrodo se resume na distância entre o último ponto de contato elétrico à peça (geralmente o bico de contato), como mostra a Figura 6 abaixo:

Figura 6 - Distância entre o bico de contato e a peça

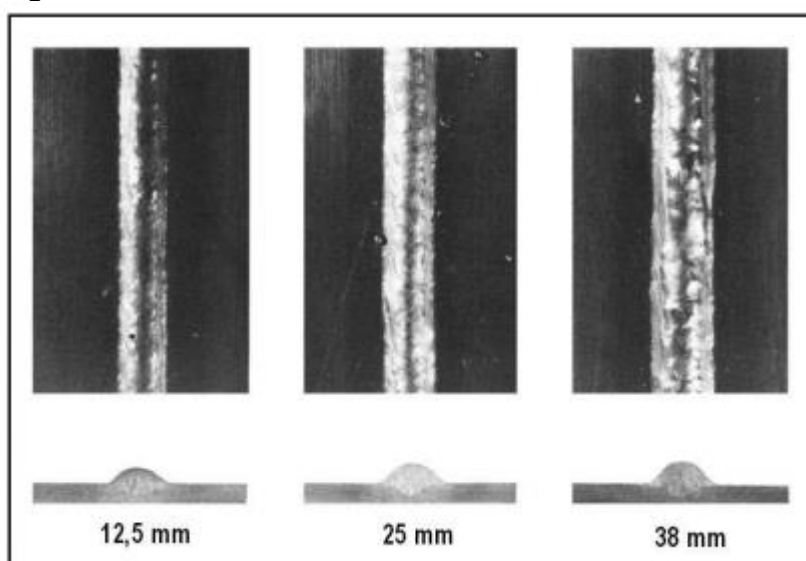


Fonte: (ESAB, 2005)

Região em que ocorre o efeito Joule, a distância entre o bico de contato e peça afeta a corrente de soldagem necessária para fundir o arame a determinada velocidade de alimentação. Basicamente, quando a distância é aumentada o aquecimento devido ao efeito Joule também aumenta diminuindo a corrente necessária. Porém grandes extensões de eletrodo podem causar uma geometria desfavorável do cordão, baixa penetração e baixa estabilidade de arco. (ESAB, 2005)

A extensão do eletrodo também afeta, até certo limite, as características do cordão de solda. Quando são empregadas grandes extensões de eletrodo para aumentar a taxa de deposição, o reforço aumenta em maior proporção que a largura, tornando o cordão mais protuberante, conforme Figura 7. (ESAB, 2005)

Figura 7 - Efeito da extensão do eletrodo nas características do cordão de solda

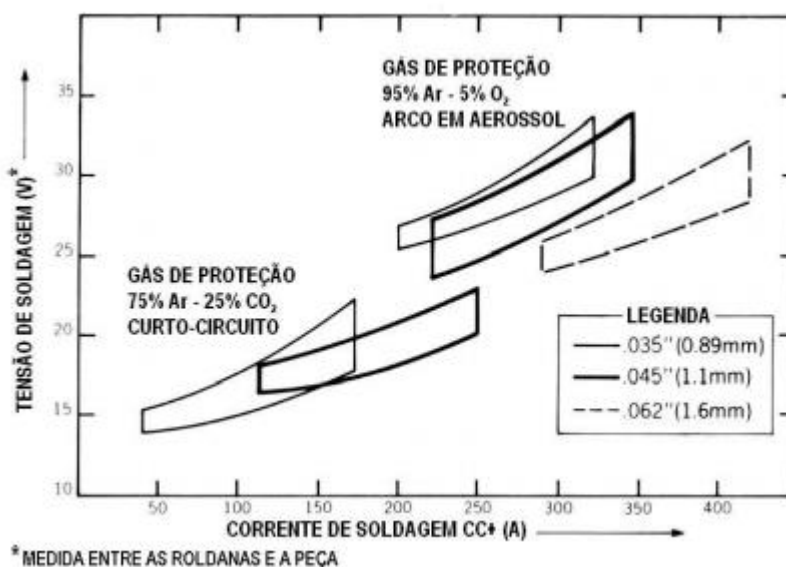


Fonte: (ESAB, 2005)

3.1.2.3 Tensão

A tensão de soldagem controla diretamente o comprimento do arco. A tensão do arco não pode ser lida diretamente no voltímetro da fonte devido às quedas de tensão do sistema de soldagem. A tensão de soldagem (comprimento de arco) tem uma grande influência sobre o tipo de transferência de metal. A soldagem por aerossol requer tensões maiores e a soldagem por curto-circuito é realizada com tensões relativamente baixas. Pode-se observar na Figura 08, que a tensão de soldagem está ligada à corrente, se a corrente e taxa de fusão do arame são aumentadas deve-se aumentar também a tensão para manter a estabilidade do arco. (ESAB, 2005)

Figura 8 - Relação Tensão do arco x Corrente



Fonte: (ESAB, 2005)

Para uma mesma corrente, uma tensão mais baixa provocará cordões mais estreitos e maior penetração, o oposto acontecendo para tensões mais altas, além da ocorrência de salpicos grosseiros. (BARRA, 2003)

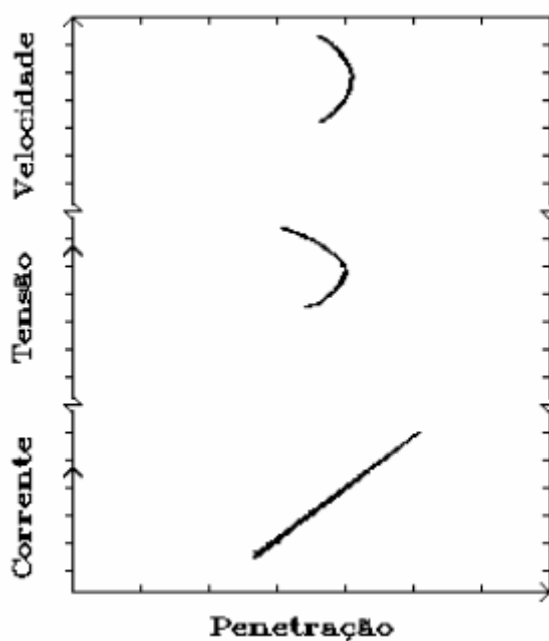
3.1.2.4 Velocidade de soldagem

A velocidade de soldagem é a velocidade em que a tocha se desloca pela peça. Geralmente medida em cm/min ou mm/min. Tem uma influência clara sobre a taxa de deposição e deve ser a maior possível para uma melhor produtividade, porém, se

muito elevada pode acarretar em uma menor distorção da estrutura, ZAC mais estreita, menor distorção da estrutura e uma diminuição das dimensões gerais do cordão e da taxa de penetração. (MACHADO, 1996)

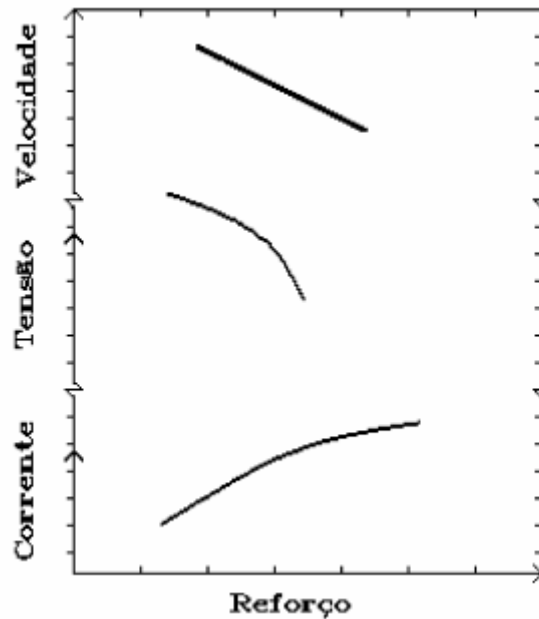
As Figuras 9, 10 e 11 mostram as relações entre corrente, tensão e velocidade sobre a penetração, o reforço e a largura do cordão. As ilustrações são genéricas, as tendências são validas para todos matérias base, consumíveis e demais variáveis. (MACHADO, 1996)

Figura 9 - Efeitos dos parâmetros sobre a penetração



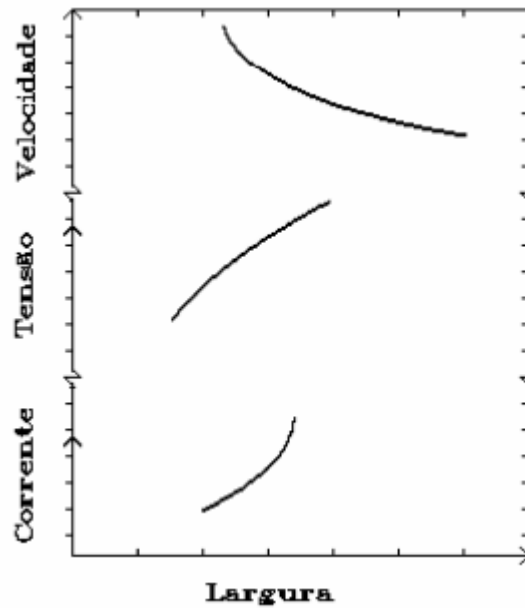
Fonte: (MACHADO, 1996)

Figura 10 - Efeitos dos parâmetros sobre o reforço



Fonte: (MACHADO, 1996)

Figura 11 - Efeito dos parâmetros sobre a largura

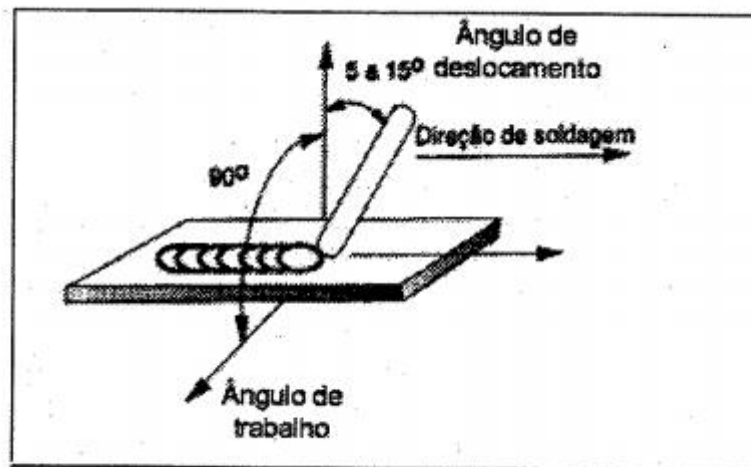


Fonte: (MACHADO, 1996)

3.1.2.5 Ângulo da tocha

A orientação da tocha em relação a peça é definida pelo ângulo de deslocamento (definido pelo plano paralelo à linha de simetria do cordão e perpendicular ao plano de soldagem) e pelo ângulo de trabalho (definido pelo plano perpendicular à linha de simetria do cordão e perpendicular ao de soldagem). Como mostra a Figura 12.

Figura 12 - Ângulos de orientação da tocha



Fonte: (MARQUES, 1991)

Existem duas técnicas de soldagem que dizem respeito à posição da tocha, a soldagem puxando e a soldagem empurrando, como mostra a Figura 13. Na técnica puxando o arame é alimentado no sentido oposto ao do deslocamento e é adicionado no metal já depositado. Na técnica empurrando, o arame é alimentado no sentido do deslocamento e, em sua maior parte, diretamente sobre a peça.

Figura 13 - Soldagem puxando e empurrando



Fonte: (ESAB, 2005)

Para soldagens de chapas com o ângulo entre si de 90°, geralmente se usa um ângulo de trabalho de 45°, enquanto para uma junta de topo esse ângulo pode ficar quase na vertical.

Para soldagens na horizontal e vertical-descendente, preferencialmente se usa um ângulo positivo(puxando) entre 15° e 20°. Já para a soldagem na vertical-ascendente se usa preferencialmente um ângulo negativo (empurrando) de 5°. (MACHADO, 1996)

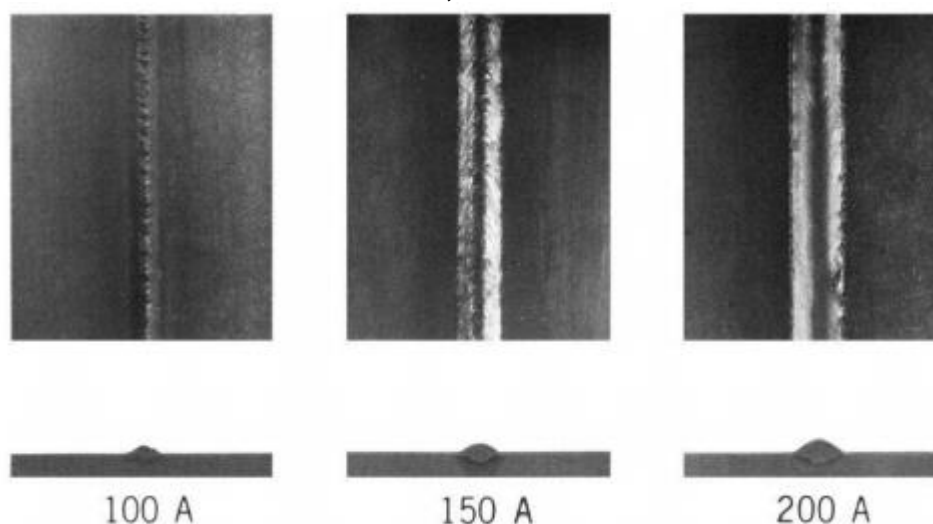
3.1.3 Características do cordão de solda

Os cordões de solda possuem algumas características as quais são muito importantes para o resultado final da soldagem, dependendo do resultado esperado, pode-se alterar os parâmetros para atingir as características do cordão pretendido.

3.1.3.1 Penetração

A penetração é a profundidade em que a linha de fusão se entende abaixo da superfície do material base. Diretamente proporcional à corrente, quanto maior a penetração maior deverá ser a corrente e com uma corrente menor se obtém uma menor penetração. Nota-se também que um aumento na extensão do eletrodo (distância entre o bico de contato e a peça) acarreta em uma diminuição da corrente, logo, uma diminuição da penetração e com uma diminuição da extensão do eletrodo nota-se um aumento da corrente e da penetração. Na Figura 14 podemos ver os efeitos da corrente de soldagem sobre a penetração.

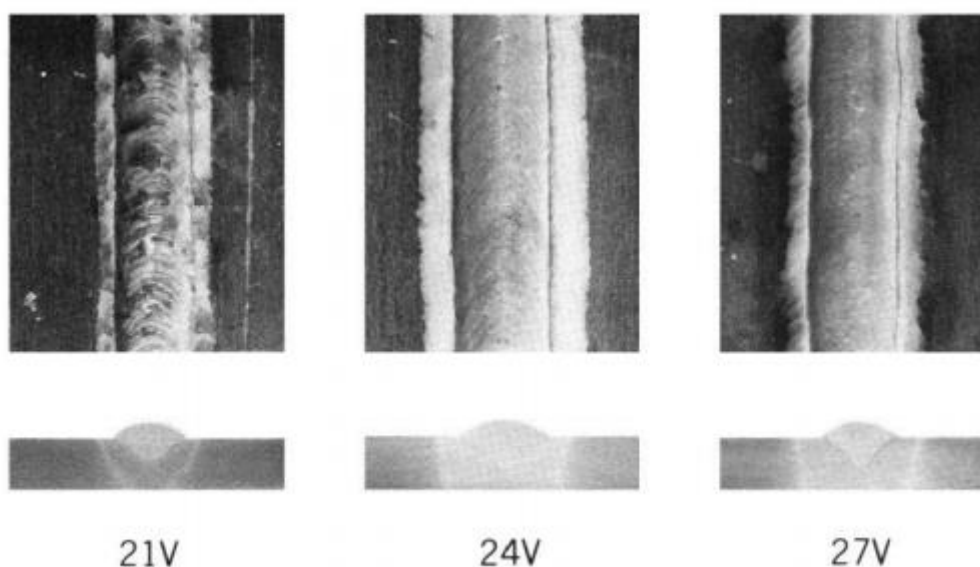
Figura 14 - Efeito da corrente de soldagem na penetração da solda – aço carbono, curto-circuito, Ar-25%CO₂



Fonte: (ESAB, 2005)

Os demais fatores possuem um efeito relativamente pequeno sobre a penetração. No exemplo a seguir, temos que com uma tensão de 24V uma maior penetração e uma menor penetração quando essa tensão é aumentada ou diminuída. A tensão de 24V garante uma maior estabilidade de arco que aumenta a penetração, conforme a Figura 15.

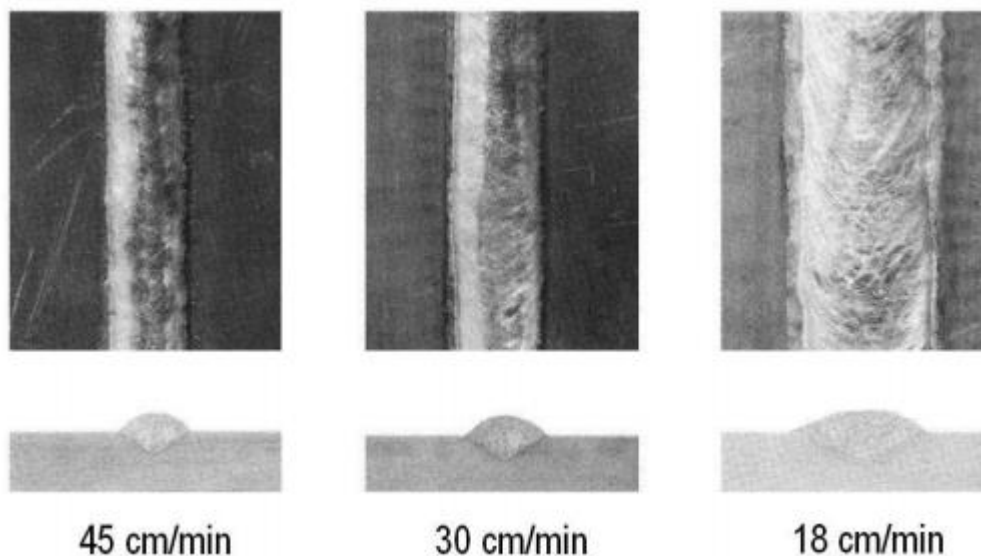
Figura 15 - Efeito da tensão de soldagem na penetração da solda – alumínio, aerossol, argônio



Fonte: (ESAB, 2005)

Os efeitos da velocidade de soldagem sobre a penetração se assemelham aos efeitos da tensão, para determinado valor se obtém uma penetração máxima que diminui se a velocidade é alterada tanto para mais quanto para menos, como podemos observar na Figura 16. Se a velocidade é baixa, muito material é depositado causando um efeito de almofadamento reduzindo a penetração e para maiores velocidades não há tempo para que o calor gerado pelo arco atinja as regiões apropriadas do metal base.

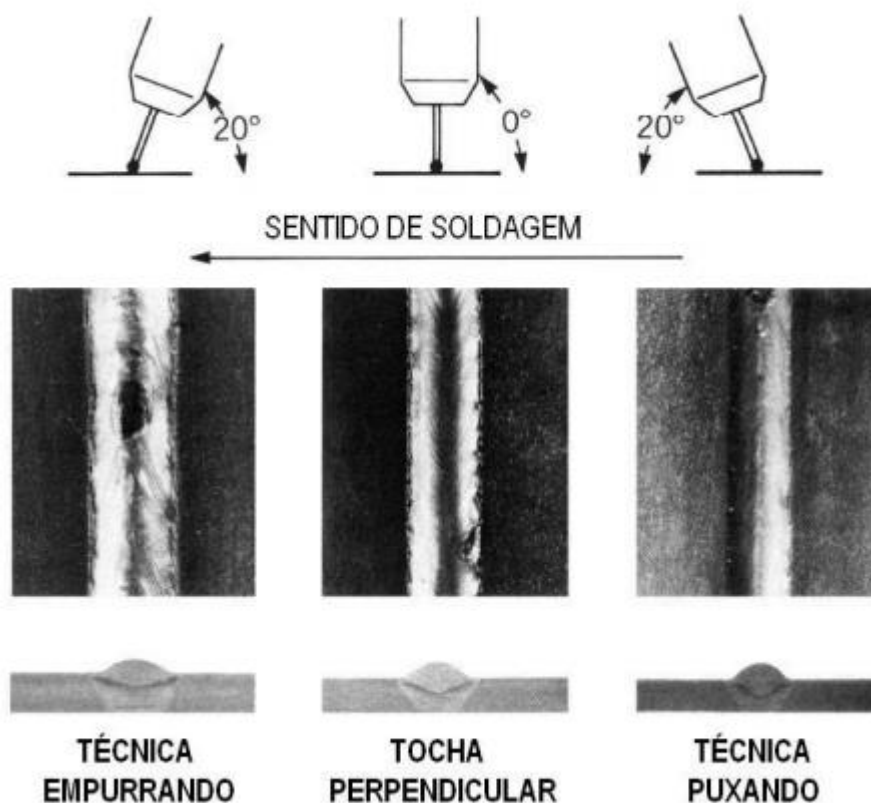
Figura 16 - Efeito da velocidade de soldagem na penetração da solda – alumínio, aerossol, argônio



Fonte: (ESAB, 2005)

A posição e técnica de soldagem possui um efeito maior sobre a penetração do que a tensão e velocidade. Pode ser observado na Figura 17 que a técnica de soldagem puxando assegura uma maior profundidade enquanto a técnica empurrando garante uma penetração mais rasa. Em materiais de pequena espessura onde geralmente é necessária uma menor penetração se usa a soldagem empurrando.

Figura 17 - Efeito da posição longitudinal da tocha na penetração da solda



Fonte: (ESAB, 2005)

3.1.3.2 Taxa de deposição

A taxa de deposição se resume na quantidade de metal depositado em uma hora de arco aberto. É calculada pela velocidade de alimentação do arame multiplicada por sessenta minutos e dividida pela quantidade de metros por quilo de arame. Conforma a equação 01 abaixo. Como o processo MIG/MAG é muito eficiente muito pouco de material se perderá em forma de respingos.

$$\text{Taxa de deposição} \left(\frac{\text{kg}}{\text{h}} \right) = \frac{\text{vel.alim.arame(m/min)} \times 60\text{min/h}}{\text{m/kg de arame}} \quad (01)$$

A taxa de deposição é equivalente à velocidade do arame e quanto maior a velocidade de alimentação maior deve ser a corrente como já mostrado na seção 3.1.2.1. Por sua vez a corrente necessária para atingir determinada taxa de deposição pode ser alterada variando-se a extensão do eletrodo. Logo a velocidade de alimentação do arame pode ser aumentada com o aumento da extensão do eletrodo para manter a corrente constante como vemos na Figura 18.

Figura 18 - Efeito da extensão do eletrodo na taxa de deposição



Fonte: (ESAB, 2005)

Na soldagem de peças finas a altas velocidades são empregadas longas extensões de eletrodo para ser mantida uma corrente relativamente baixa. O que também tem efeito sobre a penetração. Como mais material está sendo depositado com a mesma corrente a penetração é reduzida. Normalmente se usa a técnica de soldagem empurrando.

Neste capítulo foram apresentados os parâmetros de soldagem e características do cordão, a Tabela 1 apresenta um resumo dos parâmetros e das modificações necessárias para alterar as características da solda.

Tabela 1 - Ajustes nos parâmetros e técnicas de soldagem

Variáveis de soldagem para modificar	Modificações desejadas							
	Penetração		Taxa de deposição		Área da seção reta do cordão		Largura do cordão	
	↑	↓	↑	↓	↑	↓	↑	↓
Corrente e vel. alim. arame	↑	↓	↑	↓	↑	↓	+	+
Tensão	+	+	*	*	*	*	↑	↓
Velocidade de soldagem	+	+	*	*	↓	↑	↓	↑
Extensão do eletrodo	↓	↑	↑	↓	↑	↓	↑	↓
Diâmetro do arame	↓	↑	↓	↑	*	*	+	+
Gás de proteção %CO ₂	↑	↓	*	*	*	*	*	*
Ângulo da tocha	puxando a 25°	empurrando	*	*	*	*	puxando	empurrando

* sem efeito + pequeno efeito ↑ aumento ↓ diminuição

Fonte: (ESAB, 2005)

3.1.4 Soldagem de revestimento

A soldagem de revestimento é definida pela AWS como a deposição de uma camada de metal de adição sobre a superfície de outro metal com o objetivo de obter propriedades ou dimensões desejadas. (PHILLIPS, 1965)

Este processo é amplamente empregado na indústria quando se deseja: Prorrogar a vida útil de peças que não possuem todas as propriedades para determinada aplicação, recuperar elementos afetados pelo desgaste ou corrosão, ou para criar superfícies com características especiais.

Componentes industriais estão sujeitos aos mais diversos tipos de desgaste e geralmente possuem um elevado custo de substituição, logo a extensão da vida útil de tais componentes resulta em economias significativas. (GOMES, 2010)

Os metais de adição têm a finalidade de melhorar a resistência à corrosão, resistência ao desgaste, resistência à altas temperaturas, aumento da dureza,

controle dimensional ou para obtenção de algumas necessidades metalúrgicas. (MURUGAN e PARMAR, 1997)

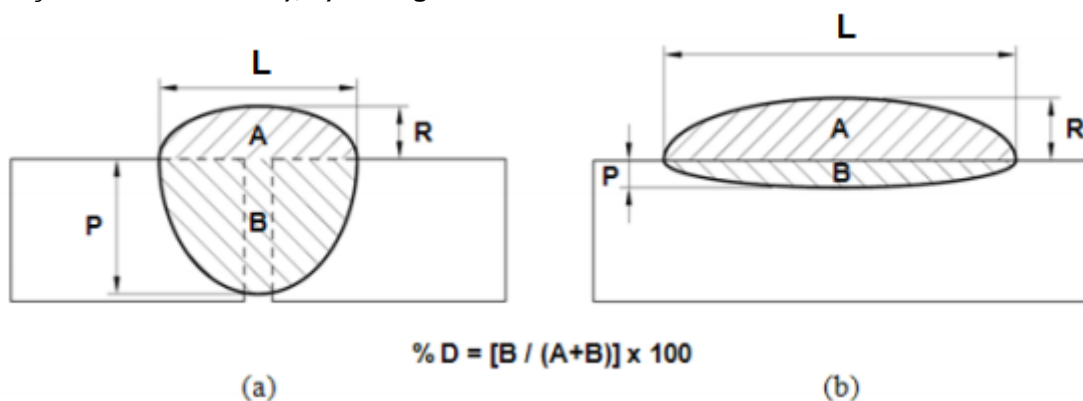
Segundo Gomes, (GOMES, 2010), essas características contribuem para que a soldagem de revestimento apresente as seguintes vantagens:

- Melhoria das propriedades superficiais no local desejado;
- Fácil uso de materiais de dureza elevada e ligas resistentes ao desgaste;
- Aplicação rápida do processo de revestimento;
- Uso econômico de elementos de liga de custos elevados;
- Proteção das peças;
- Obtenção de economias em função da extensão da vida útil dos componentes, redução de manutenção, substituição e recuperação de peças desgastadas, utilização de materiais base de baixo custo, redução do consumo de energia em serviço, aumento da eficiência dos componentes.

3.1.4.1 Características do processo

A principal característica da soldagem de revestimento se resume na geometria do cordão de solda. Enquanto na soldagem convencional se busca uma alta penetração (P) para garantir a resistência da junta soldada (Figura 19a), na soldagem de revestimento é desejável uma grande largura de cordão (L), altos reforços (R), baixas penetrações (P) e baixos percentuais de diluição (D), como mostra a Figura 19b.

Figura 19 - Perfil geométrico desejado do cordão de solda: a) união da junta soldada (aplicações convencionais); b) soldagem de revestimento



Fonte: (GOMES, 2010)

Essas características do cordão permitem recobrir uma maior área com um menor número de passes, assegurando assim uma maior economia de materiais e tempo. Um dos maiores desafios da soldagem de revestimento é adequar os parâmetros de soldagem corretamente para que se obtenha a geometria de cordão desejada.

3.1.5 Soldagem de revestimento de aços carbono com aços inoxidáveis

A soldagem de revestimento de aços carbono com aços inoxidáveis se trata da deposição de uma camada de aço inoxidável sobre superfícies de aços carbono ou baixa liga com o objetivo de se obter um revestimento com propriedades anticorrosão.

Como o custo dos aços inoxidáveis é muito maior do que dos aços carbono, a principal vantagem desse processo está no fato de que se pode produzir peças com superfícies anticorrosivas com um menor custo. (GOMES, 2010)

As características desejadas no material depositado se resumem à uma resistência razoável, boa soldabilidade com o metal base e boas propriedades de resistência à corrosão geral e corrosão localizada. (KANNAN e MURUGAN, 2006)

Este processo possui grande aplicabilidade nos diversos tipos de indústrias como as indústrias petrolíferas, químicas, alimentícias, agrícolas, nucleares, navais, ferroviária, de construção civil, além várias outras. Porém, além de todos esses fatores positivos, como apresentado anteriormente a principal dificuldade na soldagem de revestimento é ajustar adequadamente os parâmetros para que o cordão possua a geometria desejada. Além disso observa-se que no processo de revestimento de aços carbono com aços inoxidáveis a qualidade do revestimento está diretamente ligada à porcentagem de diluição. O processo se propõe à unir dois matérias com composições químicas diferentes, logo, a mistura dos elementos presentes no aço carbono com os elementos do aço inox podem comprometer as propriedades anticorrosivas. Portanto o controle da diluição é muito importante para esse tipo de processo. (GOMES, 2010)

3.1.5.1 Arames inoxidáveis

Para escolher adequadamente o arame alguns aspectos devem ser observados: Os gases de proteção normalmente limitados a Ar / 1% O₂ para a soldagem em aerossol e 90% He / 7,5% Ar / 2,5% CO₂ para curto-circuito. Todos os

arames podem ser empregados com qualquer gás. Os arames geralmente são escolhidos para combinar com o material base, exceto na soldagem de revestimento. Os níveis de desoxidantes são de extrema importância, na tabela 2 podemos ver os requisitos de composição química e as designações dos arames inoxidáveis abrangidos pela AWS. Diferentemente dos arames de aço carbono, não há requisitos de propriedades mecânicas para o metal de solda depositado. (ESAB, 2005)

Tabela 2 - Eletrodos de aços inoxidáveis

AWS	C	Cr	Ni	Mo	Nb+Ta	Mn	Si	P	S
ER308	≤0,08	19,5-22,0	9,0-11,0			1,0-2,5	0,25-0,60	≤0,03	≤0,03
ER308L	≤0,03	19,5-22,0	9,0-11,0			1,0-2,5	0,25-0,60	≤0,03	≤0,03
ER309	≤0,12	23,0-25,0	12,0-14,0			1,0-2,5	0,25-0,60	≤0,03	≤0,03
ER310	0,08-0,15	25,0-28,0	20,0-22,5			1,0-2,5	0,25-0,60	≤0,03	≤0,03
ER312	≤0,15	28,0-32,0	8,0-10,5			1,0-2,5	0,25-0,60	≤0,03	≤0,03
ER316	≤0,08	18,0-20,0	11,0-14,0	2,0-3,0		1,0-2,5	0,25-0,60	≤0,03	≤0,03
ER316L	≤0,03	18,0-20,0	11,0-14,0	2,0-3,0		1,0-2,5	0,25-0,60	≤0,03	≤0,03
ER317	≤0,08	18,5-20,5	13,0-15,0	3,0-4,0		1,0-2,5	0,25-0,60	≤0,03	≤0,03
ER318	≤0,08	18,0-20,0	11,0-14,0	2,0-3,0	8xC-1,0	1,0-2,5	0,25-0,60	≤0,03	≤0,03
ER320	≤0,07	19,0-21,0	32,0-35,0	2,0-3,0	8xC-1,0	≤2,5	0,6	≤0,04	≤0,03
ER347	≤0,08	19,0-11,0	9,0-11,0		8xC-1,0	1,0-2,5	0,25-0,60	≤0,03	≤0,03

Fonte: (ESAB, 2005)

4 METODOLOGIA

A partir dos conceitos apresentados, este capítulo tem como objetivo expor os métodos e equipamentos utilizados, os parâmetros de soldagem definidos e a realização dos experimentos.

4.1 Equipamentos e parâmetros

Como mencionado nos capítulos anteriores, o objetivo do presente trabalho é a otimização do processo MIG/MAG para a soldagem de revestimento de chapas de aço carbono ABNT 1020 com aço inoxidável ABNT 308L. Busca-se encontrar uma combinação ótima dos parâmetros de soldagem que permita uma maximização das características do cordão de solda desejadas para a soldagem de revestimento.

Essas características desejadas são uma maior largura, maior reforço, menor penetração e menor diluição. Busca-se também, quanto à produtividade, uma maior taxa de deposição e um maior rendimento. Sem comprometer a qualidade superficial e procurando obter uma ocorrência nula de defeitos.

Os principais parâmetros de entrada são a velocidade de alimentação do arame, corrente, tensão, velocidade de soldagem, distância bico de contato peça, ângulo da tocha e gás de proteção.

A velocidade de soldagem e a distância entre a peça e o eletrodo foram os parâmetros analisados nesse trabalho. Portanto, os demais foram definidos como parâmetros fixos. O gás de proteção utilizado foi Ar + 2%O com uma vazão de 12 l/min, recomendado para a soldagem de aços inoxidáveis. A corrente de soldagem empregada foi 200 A, CC e eletrodo positivo. A velocidade de alimentação do arame ficou definida em 8 m/min e o ângulo da tocha utilizado foi de 90° empurrando.

4.2 Realização dos experimentos

O metal de base utilizado foi o aço carbono ABNT 1020 em chapas de 40 mm x 6,25 mm x 210 mm e o metal de adição foi o arame ABNT 308L de 1 mm de diâmetro.

Foram realizados 4 ensaios, variando a velocidade de soldagem, com o auxílio de um dispositivo para a movimentação da tocha, em dois níveis: 250 e 300 mm/min. E com a distância entre eletrodo e peça de 20 mm e 25 mm, conforme a Tabela 03.

Tabela 3 - Ensaio e variáveis de entrada

ENSAIO	DISTANCIA BICO CONTATO PEÇA (MM)	VELOCIDADE DE SOLDAGEM (MM/MIN)
A1	20	300
A2	20	250
A3	25	250
A4	25	300

Fonte: Autoria própria

5 RESULTADOS E DISCUSSÕES

As respostas analisadas compreendem a largura do cordão (L), penetração (P) e reforço (R), correspondentes à morfologia do cordão. As medições das respostas foram feitas com microscópio Dinolite, ampliação de cinquenta vezes. Foram medidas duas amostras de cada peça e três vezes cada dimensão, obtendo-se a seguinte tabela de respostas.

Tabela 4 - Resultados

AMOSTRA	L 1	L 2	L 3	R 1	R 2	R 3	P 1	P 2	P 3
A1A	8,92	9,07	9,07	3,15	3,22	3,29	2,85	2,86	2,71
A1B	7,61	7,53	7,61	3,15	3,07	3,09	2,61	2,56	2,49
A2A	10,51	10,59	10,70	3,55	3,61	3,53	2,69	2,76	2,75
A2B	11,14	11,37	11,29	3,51	3,55	3,63	3,21	2,98	3,23
A3A	8,74	8,74	8,67	3,29	3,14	3,29	2,39	2,51	2,57
A3B	10,16	10,23	10,11	3,29	3,26	3,28	2,69	2,74	2,57
A4A	6,81	6,76	6,72	3,11	3,20	3,10	2,24	2,20	2,20
A4B	7,24	7,21	7,19	3,37	3,31	3,30	2,49	2,48	2,50

Fonte: Autoria própria

A partir da tabela 4 foram calculadas as médias e o desvio padrão das medidas obtidas:

Tabela 5 - Médias e desvio padrão.

AMOSTRA	L Média	Desvio Padrão	R Médio	Desvio Padrão	P Média	Desvio Padrão
A1A	9,022	0,085	3,219	0,074	2,807	0,088
A1B	7,583	0,043	3,104	0,038	2,551	0,060
A2A	10,599	0,091	3,563	0,039	2,734	0,042
A2B	11,269	0,117	3,564	0,062	3,138	0,141
A3A	8,716	0,042	3,237	0,087	2,491	0,091
A3B	10,167	0,063	3,275	0,013	2,666	0,087
A4A	6,761	0,041	3,141	0,055	2,214	0,026
A4B	7,213	0,027	3,323	0,037	2,487	0,008

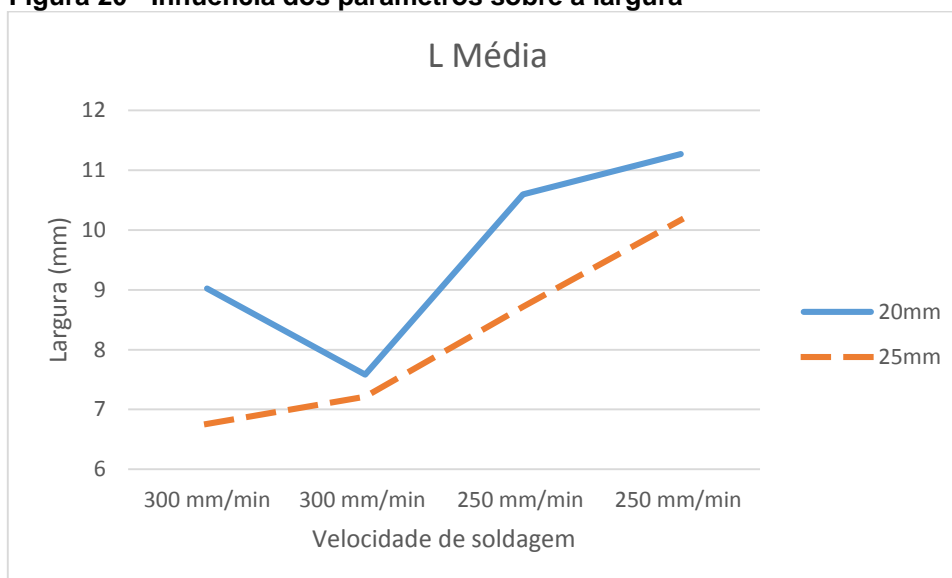
Fonte: Autoria própria

Para analisar as respostas foram gerados gráficos e estudados os resultados de cada variável separadamente.

5.1 Largura

Na Figura 20 podemos visualizar e comparar os efeitos da velocidade de soldagem e da distância entre eletrodo e peça sobre a largura. Nota-se um aumento da largura do cordão quando se diminuí a velocidade de soldagem e também quando se diminui a distância eletrodo-peça.

Figura 20 - Influência dos parâmetros sobre a largura



Fonte: Autoria própria

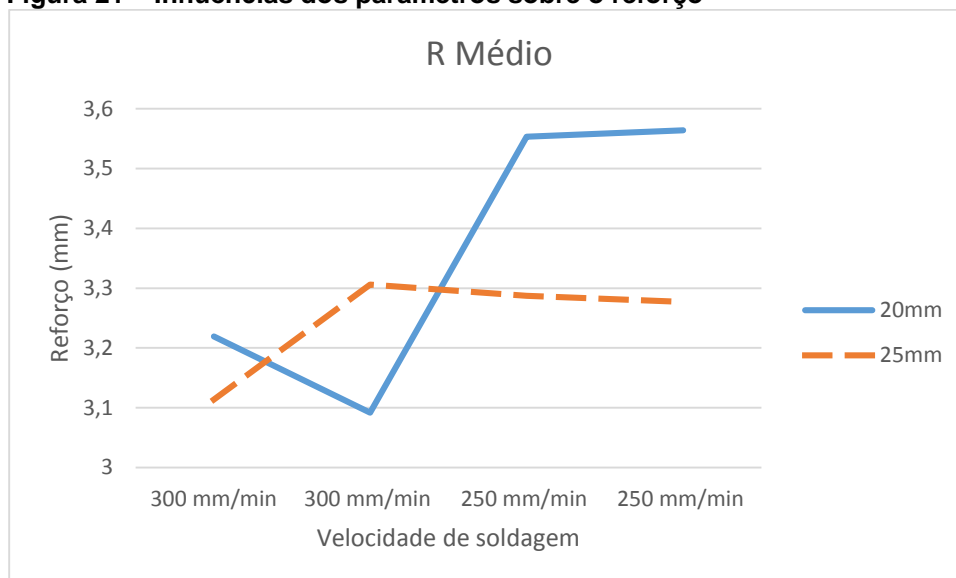
A largura mínima de acordo com a tabela 5 foi de 6,761 mm para uma velocidade de 300 mm/min e uma distância de 25 mm. E a máxima de 11,269 com uma velocidade de 250 mm e uma distância de 20 mm. Houve um aumento da largura com a diminuição da velocidade, resultado esperado pois com uma menor velocidade mais material é depositado sobre a peça. Também houve um aumento da largura com a diminuição da distância entre eletrodo e peça, pois o aumento da distância aumenta o comprimento e o efeito Joule do arco elétrico, gerando uma queda de calor na poça de fusão, essa queda de calor diminui as dimensões do cordão. Esses mesmos efeitos sobre a morfologia do cordão também foram confirmados por Gomes et al (GOMES, 2010).

Como na soldagem de revestimento se busca uma maior largura para aumentar a área de material coberta em um único passe, menores velocidades e tamanho do eletrodo são vantajosos do ponto de vista da largura.

5.2 Reforço

Na Figura 21 podemos ver os efeitos das variáveis sobre o reforço.

Figura 21 – Influências dos parâmetros sobre o reforço



Fonte: Autoria própria

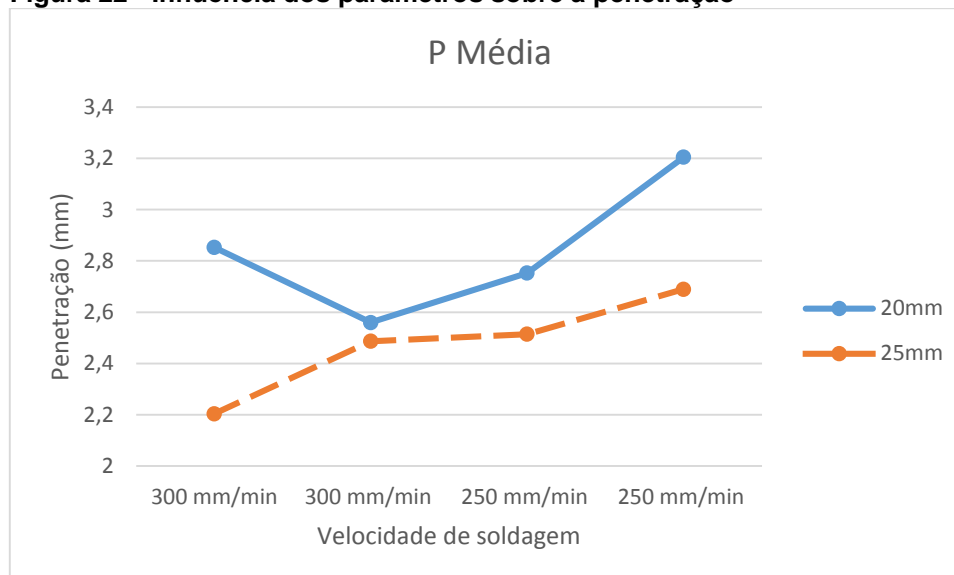
Os ensaios com maior reforço nitidamente foram os com 20 mm de distância e velocidade de 250 mm/min, atingindo no máximo 6,564 mm. O menor valor obtido foi de 3,104 mm, com uma velocidade de 300 mm/min e 20 mm de distância. Houve um aumento do reforço com uma diminuição da velocidade, assim como na largura, com uma menor velocidade mais metal é depositado por unidade de comprimento em um certo tempo. Ocorreu também um aumento do reforço com a diminuição da distância entre o bico de contato e peça. O aumento desse parâmetro gera uma queda de calor na poça de fusão, o que faz com que o metal fundido não tenha energia suficiente para penetrar no metal base e se acumule sobre o mesmo, aumentando o reforço. Esses mesmos reflexos foram obtidos por Gomes et al (GOMES, 2010), na soldagem com arame tubular inoxidável austenítico como metal de adição.

5.3 Penetração

Como já dito na seção 3.1.2.2 podemos notar uma menor penetração com uma maior distância entre eletrodo e peça, causada pelo aumento do efeito Joule. O que pode ser negativo para determinadas aplicações mas é positivo na soldagem de

revestimento. Notamos também um ligeiro aumento da penetração com a diminuição da velocidade de soldagem, conforme a Figura 22.

Figura 22 - Influência dos parâmetros sobre a penetração



Fonte: Autoria própria

A maior penetração obtida foi de 3,138 mm no ensaio com velocidade de soldagem de 250 mm/min e 20 mm de distância entre o bico de contato e a peça. O menor valor para a penetração foi de 2,214 mm, com uma velocidade de 300 mm/min e distância de 25 mm.

6 CONCLUSÕES

A maior largura da soldagem de revestimento foi de 11,269 mm, obtida com velocidade de soldagem de 250 mm/min e distância entre bico de contato e peça de 20 mm. A menor penetração foi obtida no ensaio com 300 mm/min e 25 mm, alcançando 2,214 mm. Por fim, o maior reforço obtido foi de 3,564 mm, com uma velocidade de 250 mm/min e 20 mm de distância bico de contato peça. Baseado nos resultados obtidos podemos chegar às seguintes conclusões:

- Maiores largura podem ser obtidas com uma menor velocidade de soldagem e menor distância entre o eletrodo e a peça.
- O aumento do reforço é obtido através de menores velocidades e menores distâncias.
- Menores penetrações são obtidas com um aumento da velocidade e maiores distancias.

7 REFERÊNCIAS

BARRA, S. R. **Influência do processo MIG/MAG térmico sobre a microestrutura e a geometria da zona fundida**. Universidade Federal de Santa Catarina. Florianópolis. 2003.

CORRÊA, A. **Aço inoxidável martensítico aplicado em revestimento pelo processo MIG pulsado e convencional**. Universidade Estadual de Campinas, Faculdade de Engenharia Mecânica. Campinas, p. 91. 2000.

ESAB. **Soldagem MIG/MAG**. [S.l.]. 2005.

GOMES, J. H. D. F. **Análise e otimização da soldagem de revestimento de chapas de aço ABNT 1020 com utilização de arame tubular inoxidável austenítico**. Universidade Federal de Itajubá. Itajubá, p. 136. 2010.

GROETELAARS, P. J. **Influência da variação de parâmetros de soldagem sobre a transferência metálica e perfil do cordão no processo MIG/MAG duplo arame**. Universidade Federal de Uberlândia. Uberlândia, p. 57. 2005.

KANNAN, T.; MURUGAN, N. **Prediction of ferrite number of duplex stainless steel clad metals using RSM**. [S.l.]. 2006.

MACHADO, I. G. **Soldagem e técnicas conexas: Processos**. Porto Alegre: Editado pelo autor, 1996. 477 p.

MARQUES, P. V.; MODENESI, J. P. **Introdução aos processos de soldagem**. Universidade Federal de Minas Gerais. Belo Horizonte, p. 52. 2000.

MARQUES, P. V. **Tecnologia da soldagem**. [S.l.]: Esab, 1991.

MURUGAN, N.; PARMAR, R. S. **Stainless steel cladding deposited by automatic gas metal arc welding**. [S.l.]. 1997.

PHILLIPS, L. A. **Welding Handbook: Special Welding Processes and Cutting.**
London. 1965.