

**UNIVERSIDADE TECNOLÓGICA FEDERAL DO PARANÁ**  
**DEPARTAMENTO DE MECÂNICA**  
**CURSO SUPERIOR DE ENGENHARIA MECÂNICA**

**ROBSON SOPELSA**

**ANÁLISE DA DEPOSIÇÃO DE REVESTIMENTOS DE AÇO**  
**INOXIDÁVEL AWS 309L POR *MIG* EM SUBSTRATO DE AÇO**  
**CARBONO**

**TRABALHO DE CONCLUSÃO DE CURSO**

**PONTA GROSSA**

**2013**

**ROBSON SOPELSA**

**ANÁLISE DA DEPOSIÇÃO DE REVESTIMENTOS DE AÇO  
INOXIDÁVEL AWS 309L POR *MIG* EM SUBSTRATO DE AÇO  
CARBONO**

Trabalho de Conclusão de Curso apresentado como requisito parcial à obtenção do título de Bacharel em Engenharia Mecânica, do Departamento de Mecânica, da Universidade Tecnológica Federal do Paraná.

Orientador: Prof. Dr. Luciano Augusto Lourençato

**PONTA GROSSA**

**2013**



Ministério da Educação  
**Universidade Tecnológica Federal do Paraná**  
Campus Ponta Grossa  
Diretoria de Graduação e Educação Profissional  
Coordenação de Mecânica  
Engenharia Mecânica



---

## TERMO DE APROVAÇÃO

### ANÁLISE DA DEPOSIÇÃO DE REVESTIMENTOS DE AÇO INOXIDÁVEL AWS 309L POR MIG EM SUBSTRATO DE AÇO CARBONO

por

**ROBSON SOPELSA**

Este Trabalho de Conclusão de Curso foi apresentado em 18 de dezembro de 2013 como requisito parcial para a obtenção do título de Bacharel em Engenharia Mecânica. O candidato foi arguido pela Banca Examinadora composta pelos professores abaixo assinados. Após deliberação, a Banca Examinadora considerou o trabalho aprovado.

---

Prof. Dr. Luciano Augusto Lourençato  
Orientador

---

Prof. Dr. Anderson Geraldo Marena Pukasiewics  
Membro titular

---

Prof. Dr. Oscar Régis Junior  
Membro titular

---

Prof. Dr. Luiz Eduardo Melo Lima  
Responsável pelos Trabalhos  
de Conclusão de Curso

---

Prof. Dr. Thiago Antonini Alves  
Coordenador do Curso de  
Engenharia Mecânica

- O Termo de Aprovação assinado encontra-se na Coordenação do Curso –

Dedico este trabalho à minha família e aos meus amigos que, com muito carinho e apoio, não mediram esforços para que eu concluísse mais esta etapa da minha vida.

## AGRADECIMENTOS

### **Agradeço:**

à **Deus** e a **Nossa Senhora**, por mais este ensejo. Sem eles nada seria possível.

à minha namorada **Franciely de Oliveira Haracemiv**, por sempre me incentivar, auxiliar e ser a melhor companheira que um homem deseja.

à minha mãe **Roseli Sopelsa**, por dar todo suporte e incentivo durante esta empreitada.

ao meu orientador, Prof. Dr. **Luciano Augusto Lourençato**, pelos apontamentos e acompanhamento durante os experimentos.

à **Universidade Tecnológica Federal do Paraná Campus Ponta Grossa** (UTFPR-PG), pelo trabalho desenvolvido por todo seu corpo docente e funcionários, em busca da formação de profissionais de qualidade.

Por fim, a todos os colegas de curso e pessoas que, de alguma forma, participaram e colaboraram nesta etapa da minha vida.

“Alguns homens vêem as coisas como são,  
e dizem ‘Por quê?’ Eu sonho com as coisas  
que nunca foram e digo ‘Por que não?’”  
(George Bernard Shaw)

## RESUMO

SOPELSA, Robson. **Análise da deposição de revestimentos de aço inoxidável AWS 309L por MIG em substrato de aço carbono.** Defesa realizada em 2013. Número total de folhas: 80. Trabalho de Conclusão de Curso de Bacharelado em Engenharia Mecânica - Universidade Tecnológica Federal do Paraná. Ponta Grossa, 2013.

Este trabalho é um estudo referente à análise de parâmetros que permitem realizar a deposição de aço inoxidável AWS 309L em chapas de aço carbono, utilizando o processo *MIG*. Este trabalho mostra a importância dos processos de revestimento e sua utilização no mercado, mostrando o crescimento de seu uso ao longo do tempo e citando a tendência de maior utilização com a otimização de seus parâmetros. Utilizando análises metalográficas, analisamos qual a influência que a tensão, a velocidade de alimentação do arame e a velocidade de soldagem exercem na morfologia dos cordões de solda, buscando maximizar a área revestida a cada passe do cordão de solda. São feitas análises de características econômicas de cada combinação de parâmetros, levando em consideração a taxa de deposição, a taxa de fusão e o rendimento. Ao definir a melhor combinação de parâmetros, têm-se a sobreposição dos cordões que otimiza o processo, reduzindo a necessidade de processos de fabricação posteriores ao revestimento. Ao final deste trabalho, chega-se à conclusão que, o aumento da tensão de soldagem provoca um aumento na largura e redução na altura do cordão, gerando uma geometria mais adequada ao processo. O aumento da velocidade de alimentação do arame provoca a redução da largura e o aumento da altura do cordão. Também foi constatado que o aumento da velocidade de soldagem ocasionou o aumento da largura do cordão e não provocou alterações significativas na altura. Ao analisar a sobreposição, chegou-se à conclusão que acima de 40 % de sobreposição dos cordões, o revestimento torna-se irregular e com alturas excessivas, além de revestir uma área menor com a mesma quantidade de passes. Ao reduzir a sobreposição a menos de 20 %, o revestimento também mostra-se irregular, gerando muitas falhas. Combinando os melhores resultados obtidos, chegou-se à conclusão que, utilizando a tensão de 27 V, a velocidade de soldagem de 26 cm/min, a velocidade de alimentação do arame de 6 m/min e a sobreposição de 30 %, foi possível obter o melhor resultado de revestimento.

**Palavras-chave:** Revestimento de aço inoxidável. Morfologia do cordão. Parâmetros de solda.

## ABSTRACT

SOPELSA, Robson. **Analysis of the deposition of coatings AWS 309L stainless steel for MIG carbon steel substrate.** Defense held in 2013. Total number of sheets: 80. Conclusion Work Bachelor of Mechanical Engineering - Federal Technological University of Parana. Ponta Grossa, 2013.

This work is a study about the analysis of parameters which allow the deposition of AWS 309L stainless steel plates in carbon steel using *MIG* process. This work shows the importance of coating processes and their use in the market, showing the growth of its use over time and citing the tendency to use to optimize its parameters. Using metallographic analysis, we analyzed what the influence of the voltage, wire feed speed and welding speed have on the morphology of the weld beads, seeking to maximize the area covered with each pass of the weld bead. Analyses of the economic characteristics of each combination of parameters are made, taking account with the rate of deposition, the fusion rate and yield. Defining the best combination of parameters, it has the overlap of strings that optimizes the process, reducing the need for subsequent manufacturing processes to the coating. At the end of this work, it was concluded that the increase of welding voltage causes an increase in width and reduction in height of the bead, creating a more adequate to process geometry. The increase in the feed rate decreases the wire width and increasing the height of the bead. It was also noted that the increase of welding speed resulted in the increase of the bead width and no significant changes in height. By analyzing the overlap, it was concluded that over 40 % overlap of the beads, the coating becomes uneven and excessive heights, and a smaller area coated with the same amount of passes. By reducing the overlap to less than 20%, the coating also appears to be irregular, causing many flaws. Combining the best results, it was concluded that, using 27 V voltage, welding speed 26 cm / min, the wire feed speed of 6 m / min, and the overlap of 30 % was achieved for the best outcome coating.

Keywords: Stainless steel liner. Morphology of the weld bead. Welding parameters.

## LISTA DE FIGURAS

Figura 1 - Ilustração dos termos utilizados em processos de soldagem .....	20
Figura 2 - Processo de soldagem <i>GMAW</i> .....	21
Figura 3 - Equipamentos do processo <i>MIG/MAG</i> .....	22
Figura 4 - Processo de revestimento .....	24
Figura 5 - Soldagem de revestimento externo .....	25
Figura 6 - Perfil geométrico desejado do cordão de solda: a) união da junta soldada (aplicações convencionais); b) revestimento .....	26
Figura 7 - Relação entre tensão de soldagem e corrente de soldagem .....	28
Figura 8 - Característica de queima .....	30
Figura 9 - Sobreposição dos cordões de solda .....	31
Figura 10 - Ângulos de deslocamento da tocha .....	32
Figura 11 - Comparação entre ângulos de soldagem .....	33
Figura 12 - Diluição do metal de adição .....	34
Figura 13 - Experimentos para determinação da melhor combinação de parâmetros .....	41
Figura 14 - Localização dos cortes .....	42
Figura 15 - Comparação de largura dos cordões com a variação da tensão .....	49
Figura 16 - Comparação da altura dos cordões com a variação da tensão .....	50
Figura 17 - Comparação da diluição dos cordões com a variação da tensão .....	52
Figura 18 - Comparação da largura dos cordões com a variação da velocidade de alimentação do arame .....	55
Figura 19 - Comparação da altura dos cordões com a variação da velocidade de alimentação do arame .....	56
Figura 20 - Comparação da diluição dos cordões com a variação da velocidade de alimentação do arame .....	58
Figura 21 - Comparação da largura dos cordões com a variação da velocidade de soldagem .....	60
Figura 22 - Comparação da altura dos cordões com a variação da velocidade de soldagem .....	61
Figura 23 - Comparação da diluição dos cordões com a variação da velocidade de soldagem .....	62

Figura 24 - Medida das alturas para cálculo da média.....	70
Figura 25 - Comparação da altura dos experimentos 9 e 12.....	72
Figura 26 - Diferença de altura máxima .....	73
Figura 27 - Planicidade do experimento 10 .....	74

## LISTA DE GRÁFICOS

Gráfico 1 - Oscilograma de tensão e corrente de soldagem do experimento 1 .....	45
Gráfico 2 - Oscilograma de tensão e corrente de soldagem do experimento 5 .....	46
Gráfico 3 - Oscilograma de tensão e corrente de soldagem do experimento 6 .....	47
Gráfico 4 - Influência da tensão na largura do cordão .....	48
Gráfico 5 - Influência da tensão na altura do cordão .....	50
Gráfico 6 - Influência da tensão na diluição .....	51
Gráfico 7 - Influência da tensão no rendimento .....	53
Gráfico 8 - Influência da velocidade de alimentação do arame na largura do cordão .....	54
Gráfico 9 - Influência da alimentação do arame na altura do cordão .....	56
Gráfico 10 - Influência da velocidade de alimentação do arame na diluição .....	57
Gráfico 11 - Influência da velocidade de alimentação do arame no rendimento .....	58
Gráfico 12 - Influência da velocidade de soldagem na largura do cordão .....	59
Gráfico 13 - Influência da velocidade de soldagem na altura do cordão .....	61
Gráfico 14 - Influência da velocidade de soldagem na diluição .....	62
Gráfico 15 - Influência da velocidade de soldagem no rendimento .....	63
Gráfico 16 - Comparação da largura dos experimentos .....	70
Gráfico 17 - Comparação da altura média dos experimentos .....	71

## LISTA DE TABELAS

Tabela 1 - Composição química do aço ABNT 1020.....	37
Tabela 2 - Composição química do arame de aço inoxidável AWS ER309L .....	37
Tabela 3 - Parâmetros mantidos constantes .....	38
Tabela 4 - Parâmetros variáveis.....	39
Tabela 5 - Combinação de experimentos .....	39
Tabela 6 - Experimentos para análise de sobreposição.....	40
Tabela 7 - Rendimento dos experimentos.....	64
Tabela 8 - Taxa de deposição dos experimentos .....	65
Tabela 9 - Taxa de fusão dos experimentos .....	66
Tabela 10 - Largura do cordão dos experimentos.....	66
Tabela 11 - Altura do cordão dos experimentos.....	67
Tabela 12 - Diluição dos experimentos .....	68
Tabela 13 - Largura dos experimentos.....	69
Tabela 14 - Altura média dos revestimentos .....	71
Tabela 15 - Diferença de altura máxima dos experimentos .....	73
Tabela 16 - Diluição dos experimentos .....	74

## LISTA DE SIGLAS

ABNT	Associação Brasileira de Normas Técnicas
ASME	<i>American Society of Mechanical Engineers</i>
AWS	<i>American Welding Society</i>
GMAW	<i>Gas Metal Arc Welding</i>
MAG	<i>Metal Active Gas</i>
MIG	<i>Metal Inert Gas</i>

## LISTA DE SÍMBOLOS

Ap	Área de penetração
Ar	Área de reforço
D	Diluição
L	Comprimento utilizado de arame
ma	Massa de arame consumida
Mf	Massa final da chapa
Mi	Massa inicial da chapa
p	Densidade do arame
P	Penetração
R	Reforço
t	Tempo
W	Largura de cordão de solda

## SUMÁRIO

<b>1</b>	<b>INTRODUÇÃO</b> .....	<b>17</b>
1.1	OBJETIVOS.....	17
1.1	ESTRUTURA DO TRABALHO DE CONCLUSÃO DE CURSO .....	18
<b>2</b>	<b>REVISÃO DE LITERATURA</b> .....	<b>20</b>
2.1	PROCESSO DE SOLDAGEM <i>MIG/MAG</i> .....	21
2.2	PROCESSO MIG APLICADO EM REVESTIMENTO .....	23
2.3	CARACTERÍSTICAS DO PROCESSO.....	26
2.4	PARÂMETROS DO PROCESSO .....	27
2.4.1	Tensão de soldagem .....	27
2.4.2	Velocidade de soldagem.....	29
2.4.3	Velocidade de Alimentação do Arame .....	29
2.4.4	Sobreposição dos cordões .....	30
2.4.5	Distância eletrodo-peça .....	31
2.4.6	Ângulo de soldagem .....	32
2.5	INFLUÊNCIA DA DILUIÇÃO NAS PROPRIEDADES .....	33
2.6	CARACTERÍSTICAS DE DESEMPENHO DO PROCESSO DE REVESTIMENTO.....	35
<b>3</b>	<b>MATERIAIS E MÉTODOS</b> .....	<b>37</b>
3.1	MATERIAIS .....	37
3.2	MÉTODOS .....	38
3.2.1	Parâmetros constantes.....	38
3.2.2	Parâmetros variáveis.....	39
3.3	PLANEJAMENTO DOS EXPERIMENTOS .....	39
3.4	EXECUÇÃO DOS EXPERIMENTOS.....	41
3.4.1	Determinação da combinação de parâmetros .....	41
3.4.2	Análise metalográfica.....	42

3.4.3	Determinação da sobreposição .....	44
<b>4</b>	<b>RESULTADOS .....</b>	<b>45</b>
4.1	ANÁLISE DA INFLUÊNCIA DA TENSÃO NO PROCESSO DE REVESTIMENTO.....	45
4.1.1	Influência da tensão na largura do cordão .....	47
4.1.2	Influência da tensão na altura do cordão .....	49
4.1.3	Influência da tensão na diluição.....	51
4.1.4	Influência da tensão no rendimento .....	52
4.2	ANÁLISE DA INFLUÊNCIA DA VELOCIDADE DE ALIMENTAÇÃO DO ARAME NO PROCESSO DE REVESTIMENTO .....	53
4.2.1	Influência da velocidade de alimentação do arame na largura do cordão .....	54
4.2.2	Influência da velocidade de alimentação do arame na altura do cordão .....	55
4.2.3	Influência da velocidade de alimentação do arame na diluição .....	57
4.2.4	Influência da velocidade de alimentação do arame no rendimento .....	58
4.3	ANÁLISE DA INFLUÊNCIA DA VELOCIDADE DE SOLDAGEM NO PROCESSO DE REVESTIMENTO .....	59
4.3.1	Influência da velocidade de soldagem na largura do cordão .....	59
4.3.2	Influência da velocidade de soldagem na altura do cordão .....	60
4.3.3	Influência da velocidade de soldagem na diluição .....	62
4.3.4	Influência da velocidade de soldagem no rendimento .....	63
4.4	CARACTERÍSTICAS DE DESEMPENHO DO PROCESSO DE REVESTIMENTO.....	63
4.4.1	Rendimento .....	64
4.4.2	Taxa de deposição.....	65
4.4.3	Taxa de fusão .....	65
4.5	CARACTERÍSTICAS GEOMÉTRICAS .....	66
4.5.1	Largura do cordão .....	66
4.5.2	Altura do cordão .....	67

4.6	DILUIÇÃO.....	67
4.7	ESCOLHA DA MELHOR COMBINAÇÃO DE PARÂMETROS.....	68
4.8	ANÁLISE DA SOBREPOSIÇÃO DOS CORDÕES.....	69
<b>5</b>	<b>CONCLUSÃO.....</b>	<b>76</b>
	<b>REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS.....</b>	<b>78</b>

## 1 INTRODUÇÃO

A soldagem de revestimento apresenta vantagens econômicas significativas, permitindo produzir superfícies com propriedades mecânicas otimizadas aliadas a um menor custo de produção.

O processo *Metal Inert Gas (MIG)* é um dos mais utilizados para realização de pequenos e médios depósitos. Devido as suas vantagens, vem sendo utilizado em revestimentos com deposição de aço inoxidável, que tem por finalidade aumentar a resistência ao desgaste, resistência à corrosão e boa capacidade de resistir a elevadas temperaturas de trabalho. Desta forma, com a melhoria das propriedades é possível reduzir custos de fabricação e manutenção, bem como aumentar a vida útil dos componentes revestidos.

Para garantir que a qualidade final dos revestimentos seja satisfatória, é necessário determinar adequadamente os parâmetros que influenciam no revestimento, para que os cordões de solda apresentem geometria adequada, aumentando a produtividade e reduzindo os custos do processo de revestimento.

Para realizar o revestimento, fazendo a deposição de arame de aço inoxidável AWS ER309L em aço carbono ABNT 1020, foram analisados os parâmetros que permitem otimizar o custo e a qualidade do processo, utilizando o processo *MIG*.

### 1.1 OBJETIVOS

Otimizar os parâmetros do processo de revestimento, realizando a deposição de arame de aço inoxidável AWS ER309L em chapas de aço carbono ABNT1020, utilizando o processo de soldagem *MIG*.

Encontrar a tensão de soldagem, velocidade de soldagem, velocidade de alimentação do arame e sobreposição dos cordões que permitam otimizar o processo, obtendo custos menores e maior qualidade.

Serão estudados os seguintes parâmetros:

- Tensão de soldagem;
- Velocidade de soldagem;

- Velocidade de alimentação do arame;  
Serão fixadas como variáveis de resposta:
- As características de desempenho do processo de revestimento (taxa de deposição, taxa de fusão e rendimento do processo);
- As características geométricas do cordão de solda (largura, penetração e reforço);
- A diluição.

Com as variáveis de influência e de respostas definidas, buscou-se definir uma combinação que permita obter a maior largura e menor altura do cordão de solda. Isto permite que a maior área possível seja coberta a cada passe de cordão de solda, respeitando os limites de diluição e penetração, definidos pela literatura pesquisada.

Com o aumento da competitividade e exigência de produtos com maior valor agregado, a indústria e as companhias de geração de energia sentem a necessidade de realizar procedimentos que reduzam custos e aumentem a qualidade do produto.

Esta pesquisa permitirá que o processo de soldagem de revestimento seja realizado com maior produtividade e qualidade.

## 1.1 ESTRUTURA DO TRABALHO DE CONCLUSÃO DE CURSO

O trabalho será estruturado em capítulos. No capítulo introdutório será apresentado a importância da soldagem entre os processos de fabricação e manutenção, bem como as vantagens de se utilizar o processo de soldagem de revestimento para se obter propriedades mecânicas que garantam um bom funcionamento aliado a uma maior vida útil dos componentes.

Os objetivos que deram norte a pesquisa foram apresentados, entre eles as variáveis de influência e as variáveis de resposta, descrevendo também quais os aspectos a serem maximizados ou minimizados para otimizar o processo.

### Capítulo 2 – Revisão de Literatura

No capítulo 2 será apresentada a revisão bibliográfica, que aborda históricos, conceitos e informações sobre processos de soldagem e sua aplicação em soldagem de revestimento de aço carbono.

Os métodos utilizados e os resultados obtidos por outros autores serão apresentados, onde serão feitas comparações entre os parâmetros utilizados nas pesquisas realizadas anteriormente. Estes parâmetros e resultados serão levados em consideração ao realizar os experimentos desta pesquisa, que será baseada nestas pesquisas.

### Capítulo 3 – Materiais

O capítulo 3 apresentará todo o aparato experimental utilizado, listando os materiais e equipamentos utilizados durante os experimentos.

### Capítulo 4 – Métodos

No capítulo 4 serão descritos os métodos utilizados durante a realização dos ensaios. Cada passo dos experimentos e análise dos corpos de prova serão descritos neste capítulo.

### Capítulo 5 – Resultados e Discussão

No capítulo 5 serão apresentados e discutidos os resultados dos ensaios, fazendo uma análise dos dados adquiridos durante a realização do estudo.

### Capítulo 6 – Conclusões

As conclusões do trabalho serão apresentadas neste capítulo.

E, por último, as referências bibliográficas.

## 2 REVISÃO DE LITERATURA

A *American Welding Society (AWS)* (1983) define o soldagem como o processo de junção de materiais que produz a coalescência dos materiais mediante o aquecimento deles a temperatura apropriada com ou sem o uso de material de enchimento.

A soldagem é o processo mais importante de união de metais usado na indústria, é utilizado desde construções mecânicas simples até estruturas complexas, que demandam maior qualidade e sofisticação no projeto. A soldagem por muitas vezes é utilizada para complementar outros processos de fabricação como a fundição, usinagem e conformação mecânica.

No processo de soldagem, geralmente usam-se alguns termos característicos. Modenesi (2008) ao referir-se sobre o processo de soldagem aponta alguns destes termos, conforme apresentado na Figura 1:

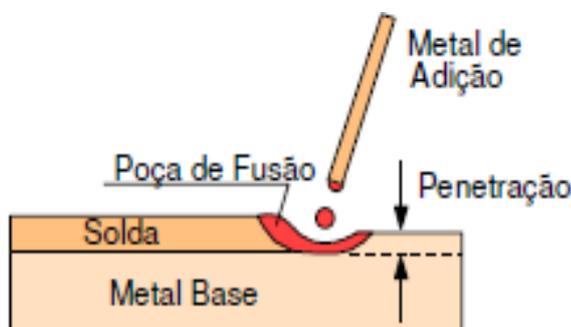


Figura 1 - Ilustração dos termos utilizados em processos de soldagem

Fonte - Modenesi (2008, p. 2)

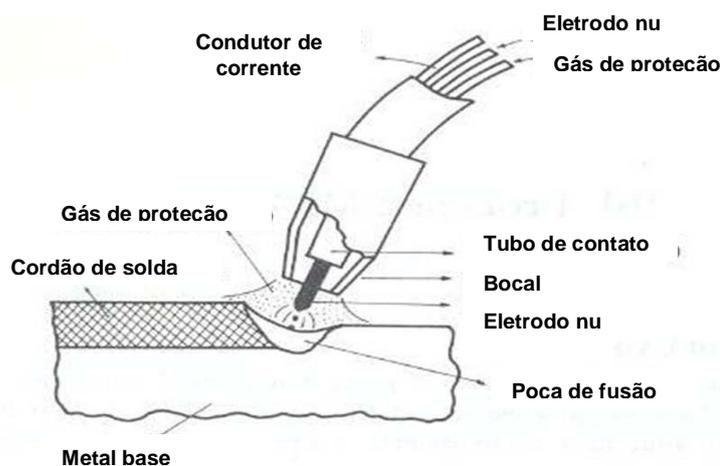
- Metal Base – é o material da peça que vai receber o processo de soldagem.
- Metal de Adição – é o material que será adicionado durante a soldagem. O metal de adição deve ser selecionado de acordo com o metal base, levando em consideração as aplicações às quais a solda será submetida. Estes materiais de adição são especificados de acordo com normas técnicas, com destaque para a Associação Brasileira de Normas Técnicas (ABNT).
- Poça de Fusão – é a região onde ocorre a fusão durante o processo de soldagem. Existem processos que não utilizam fusão, então se considera que existe uma região de processamento com aspectos similares à poça de fusão.

- Penetração – é a distância desde o metal base até o término da região de fusão.

Estes termos são de uso comum quando trata-se de soldagem, e são de extrema importância para o entendimento do processo e o quanto cada termo destes influencia nas propriedades mecânicas da solda.

## 2.1 PROCESSO DE SOLDAGEM *MIG/MAG*

O processo *MIG/MAG* é caracterizado por utilizar eletrodo consumível, sendo que o calor é gerado através de um arco elétrico formado entre o metal base e o eletrodo. A proteção do arco é feita por gás ou uma mistura de gases. A Figura 2 mostra os componentes da tocha do processo *MIG/MAG*.



**Figura 2 - Processo de soldagem *GMAW***

**Fonte - Fogagnolo (2011, p. 15)**

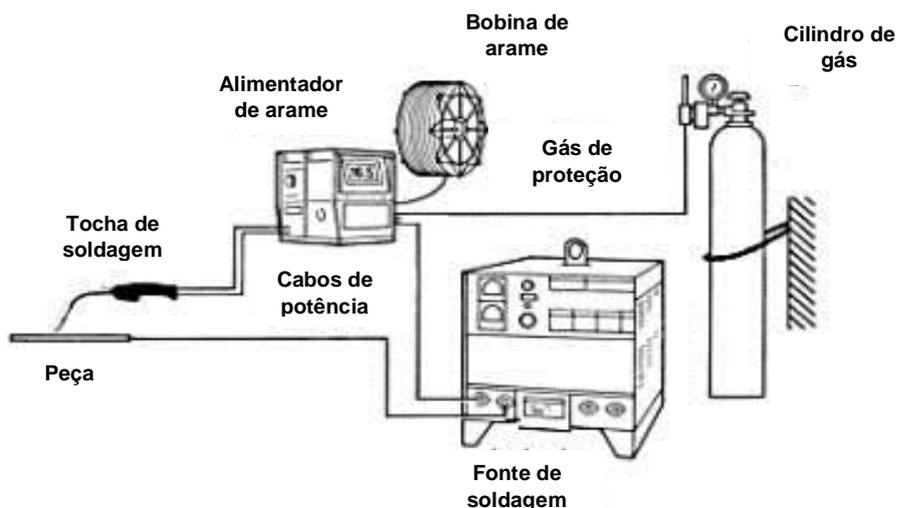
Os gases de proteção são a diferença entre o processo *MIG* e o *MAG*, sendo que no processo *MIG* utiliza-se um gás ou mistura de gases inertes, e no processo *MAG* usa-se um gás ativo ou mistura de gases ativos com inertes. Como salienta Fogagnolo (2011), a soldagem *MIG/MAG* com arame tubular foi a que apresentou maior crescimento na utilização nos últimos anos.

Wainer, Brandi e Mello (1992) citam que o processo *MIG* aplica-se a materiais como aço-carbono, aços de baixa, média e alta liga, aços inoxidáveis, alumínio,

magnésio e cobre. Já o processo *MAG* aplica-se a aços de baixo carbono e aços de baixa liga.

Estes processos são vastamente utilizados na recuperação de peças desgastadas, revestimento de superfícies com materiais que possuem as propriedades mecânicas desejadas, assim como na fabricação e manutenção de equipamentos. Vantagens como a alta produtividade, alta velocidade de soldagem e alta taxa de deposição contribuem para que este processo seja cada vez mais utilizado.

A Figura 3 mostra um exemplo de arranjo dos equipamentos do processo *MIG*, que se comparado com o processo de soldagem com eletrodo revestido, acaba tendo menos mobilidade, devido ao maior número de equipamentos necessários.



**Figura 3 - Equipamentos do processo *MIG/MAG***

**Fonte - Silva (2005, p. 1)**

Em sua pesquisa, Wainer, Brandi e Mello (1992, p. 99) destacam que o processo *MIG* possui vantagens como:

- Processo semiautomático bastante versátil, podendo ser adaptado facilmente para a soldagem automática;
- O eletrodo nu é alimentado continuamente;
- A soldagem pode ser executada em todas as posições
- A velocidade de soldagem é elevada;
- Taxa de deposição elevada devido a densidade de corrente alta na ponta do arame;

- Não há formação de escória e, conseqüentemente, não se perde tempo na sua remoção, nem se corre o risco de inclusão de escória na soldagem em vários passes;
- Penetração de raiz mais uniforme que no processo com eletrodo revestido;
- Processo com baixo teor de hidrogênio que, no caso de eletrodos nus, fica ao redor de 5 ppm/100 g de metal
- Problemas de distorção e tensões residuais diminuídos;
- Soldagem com visibilidade total da peça de fusão;
- Possibilidade de controlar a penetração e a diluição durante a soldagem;
- Facilidade de execução da soldagem.

Algumas desvantagens do processo *MIG* são descritas por Wainer, Brandi e Mello (1992, p. 100) em seu trabalho:

- Maior velocidade de resfriamento por não haver escória, o que aumenta a ocorrência de trincas, principalmente no caso de aços temperáveis;
- A soldagem deve ser protegida de correntes de ar;
- Como o bocal da pistola deve ficar próximo do metal-base a ser soldado, a operação não é fácil em locais de acesso difícil;
- Projeções de gotas de metal líquido durante a soldagem;
- Grande emissão de raios ultravioleta;
- Equipamento de soldagem mais caro e complexo que o do processo com eletrodo revestido;
- Equipamento menos portátil que o do processo com o eletrodo revestido.

A soldagem de revestimento pelo processo *MIG* se torna bastante aplicável na indústria, por possuir características como fácil automatização da soldagem, garantindo que o processo transcorra da maneira correta e gere resultados satisfatórios.

## 2.2 PROCESSO MIG APLICADO EM REVESTIMENTO

A soldagem de revestimento é definida pela AWS (1983) como a deposição de uma camada de metal de adição sobre a superfície de outro metal como o objetivo de obter propriedades ou dimensões desejadas. Gomes (2010), ao analisar o processo de soldagem de revestimento, aponta que o mesmo é realizado quando se deseja uma das seguintes aplicações:

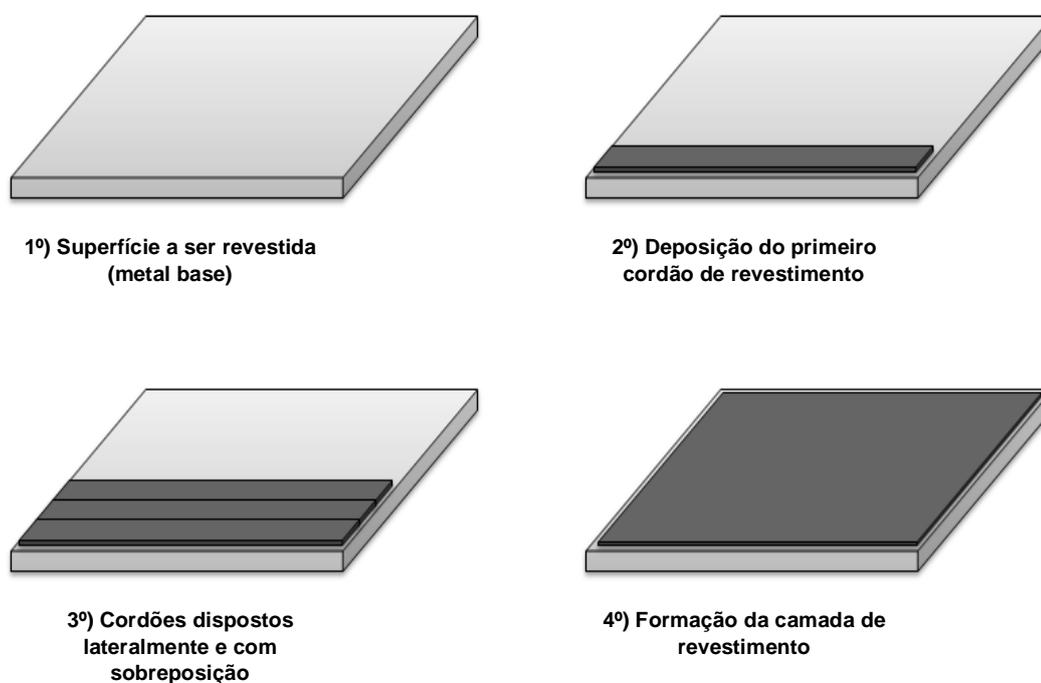
- Prorrogação da vida útil das peças que não possuem todas as propriedades necessárias para uma dada aplicação
- Recuperação de elementos afetados pelo desgaste ou corrosão
- Criação de superfícies com características especiais.

Componentes mecânicos são submetidos aos mais variados tipos de desgaste, tornando necessário realizar manutenções. Em sua pesquisa, Gomes (2010) salienta que o preço dos aços inoxidáveis é aproximadamente dez vezes maior que o preço do aço carbono.

Com o processo de revestimento é possível produzir peças com propriedades mecânicas otimizadas a um baixo custo, pois é necessário aplicar apenas uma camada de aço inoxidável. Com o processo de revestimento é possível melhorar a resistência a:

- Altas temperaturas
- Cavitação
- Corrosão
- Desgaste excessivo

Durante o processo de soldagem de revestimento, os cordões de solda são depositados paralelamente. Como mostra a Figura 4, existe uma sobreposição de cordões, até que a superfície desejada seja totalmente coberta com o revestimento.



**Figura 4 - Processo de revestimento**

**Fonte - Gomes (2010, p. 25)**

Quando se consegue uma geometria de cordão adequada, é possível cobrir a superfície desejada com menos passes. A Figura 5 mostra um exemplo de solda de revestimento aplicado na parte externa da peça.



**Figura 5 - Soldagem de revestimento externo**

**Fonte – Samra Filho (2012, p.8)**

Gomes (2010, p. 8) salienta que a soldagem de revestimento apresenta vantagens como:

- 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 de peças;
- Obtenção de economias em função 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.

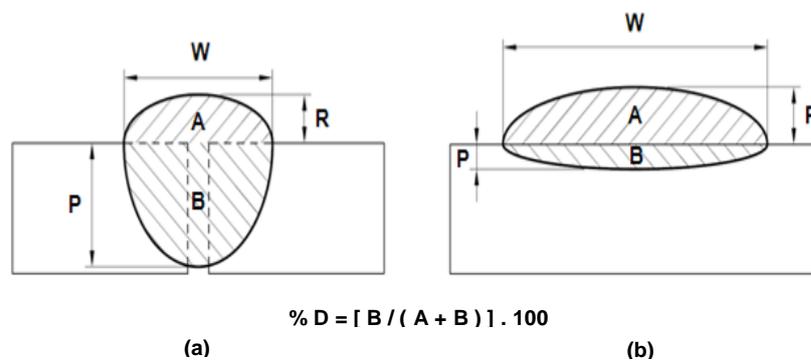
A soldagem de revestimento permite produzir peças com propriedades otimizadas com menor custo, além de permitir a execução da manutenção com baixo custo e mais rapidez.

### 2.3 CARACTERÍSTICAS DO PROCESSO

A soldagem de revestimento possui algumas características específicas para este processo de soldagem, como a geometria do cordão de solda. Em processos convencionais, geralmente é desejável obter alta penetração (P), o que garante boa resistência da junta soldada, ao contrário da soldagem de revestimento, onde a penetração deve ser baixa, para preservar as propriedades mecânicas do metal de adição.

No processo de revestimento, Gomes (2010) basicamente afirma que a geometria de cada cordão de solda deve apresentar grandes larguras de cordão (W), altos reforços (R), baixas penetrações (P) e baixa diluição (D). Em seu trabalho, Corrêa (2000) afirma que a largura, o reforço, a penetração e a diluição tem influência marcante nas propriedades mecânicas do revestimento.

A Figura 6 mostra a comparação entre o perfil geométrica de uma solda convencional e o perfil desejado num processo de revestimento.



**Figura 6 - Perfil geométrico desejado do cordão de solda: a) união da junta soldada (aplicações convencionais); b) revestimento**

**Fonte – Gomes (2010, p. 26)**

A Figura 6 apresenta as características geométricas otimizadas, onde é possível recobrir a maior área possível com menos passes.

## 2.4 PARÂMETROS DO PROCESSO

Segundo a *American Society of Mechanical Engineers (ASME)* (1983), o processo *MIG* apresenta as seguintes variáveis do processo:

- Qualificação do procedimento: Metal-base; metal de adição; tratamento térmico após soldagem; pré-aquecimento; tipo de gás de proteção; tipo de junta; posição de soldagem; características elétricas; e técnica de soldagem.
- Qualificação do soldador: Tipo de junta; metal-base; metal de adição; posição de soldagem; tipo de gás de proteção; e características elétricas.

Em sua pesquisa, Corrêa (2000) argumenta que no processo *MIG* a corrente tem uma influência indireta na penetração. Ao variar a corrente, a velocidade e a temperatura da gota são afetadas, fazendo com que a velocidade da gota seja aumentada, governando a profundidade da penetração. Corrêa (2000) ainda cita que a largura do cordão de solda é inversamente proporcional à velocidade de soldagem.

Em sua pesquisa, Wainer, Brandi, e Mello (1992) ainda citam que a quantidade de calor colocada na peça para a solda é bastante elevada, sendo mais indicado para soldagem de chapas grossas.

Segundo Gimenes Junior et al (2012), ao utilizar corrente contínua e polaridade direta no processo *MIG*, é possível obter menor penetração e aumentar a velocidade de deposição. O efeito Joule, que é responsável pelo calor na ponta do eletrodo, influencia a taxa de fusão. Quando a intensidade da corrente aumenta, o cordão de solda apresenta aumento de penetração e de largura.

### 2.4.1 Tensão de soldagem

A tensão de soldagem tem um importante efeito no modo de transferência de metal. A soldagem por curto-circuito requer tensões relativamente baixas, enquanto a soldagem em aerossol necessita de tensões maiores. É possível observar que, quando a corrente de soldagem e a taxa de fusão do arame são aumentadas, a tensão de soldagem também deve ser aumentada para manter a estabilidade.

A Figura 7 mostra a relação entre a tensão do arco e a corrente de soldagem.

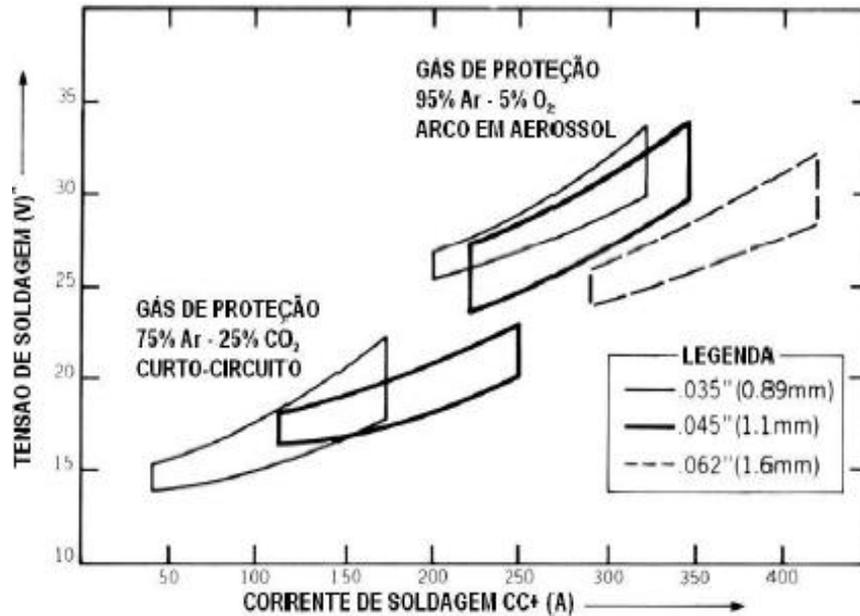


Figura 7 - Relação entre tensão de soldagem e corrente de soldagem

Fonte - Fortes (2005, p. 22)

Segundo Gimenes Junior et al (2012), com o aumento da tensão do arco existe um aumento na largura e redução na altura do cordão. Com tensões maiores é possível ainda obter melhor distribuição do metal depositado e redução da penetração. Porém, Gimenes Junior et al (2012) afirma que tensões muito altas provocam porosidade, salpicos e mordeduras, e tensões muito baixas provocam porosidade e cordões com alto ângulo de molhabilidade.

Em sua pesquisa, Corrêa (2000) variou a tensão de soldagem entre 22 V a 27 V, utilizando arame de adição de 1,2 mm de diâmetro, observando que ao realizar o procedimento com uma tensão de 22 V, o cordão de solda formado era estreito, com alto ângulo de molhabilidade e o comprimento do arco era muito pequeno. E ao realizar o procedimento com uma tensão de 27 V, observou que o cordão de solda formado era muito largo e o reforço era muito pequeno, gerando também muitos respingos, chegando à conclusão que a tensão de 25 V era a melhor condição.

Já Silva, Braga e Ferraresi (2011) variaram entre 22 V e 24 V, utilizando arame de adição de 1,2 mm de diâmetro, e após análise da qualidade do cordão chegaram à conclusão que a tensão de 24 V apresentou os melhores resultados.

Brantis (1993) realizou experimentos em tubos, com tensões entre 17 V a 24 V, utilizando arame de adição de 1,0 mm de diâmetro e observou que para níveis de tensão mais altos existe a tendência de obtenção de cordões mais largos. Silva Junior et al (2011) fixaram em 20 V, utilizando arame de adição de 1,0 mm de diâmetro.

#### 2.4.2 Velocidade de soldagem

Fortes (2005) define como velocidade de soldagem a relação entre o caminho percorrido pelo arco ao longo da peça e o tempo gasto para percorrê-lo. Esse parâmetro é normalmente expresso em cm/min ou mm/min. Fortes (2005, p. 69) cita três regras sobre velocidade de soldagem:

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

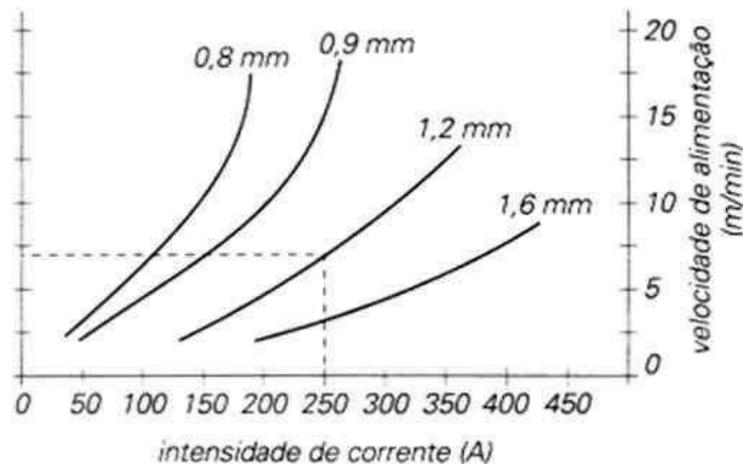
Em sua pesquisa, Corrêa (2000) fixou a velocidade de soldagem em 30 cm/min. Silva, Braga e Ferraresi (2011) também fixaram a velocidade em 30 cm/min. Brantis (1993) trabalhou com velocidades entre 17,6 a 27 cm/min, e após realizar testes fixou a velocidade em 25,3 cm/min. Silva Junior et al (2011) fixaram a velocidade em 18 cm/min.

#### 2.4.3 Velocidade de Alimentação do Arame

É definida como a velocidade com que o arame é fornecido à tocha, e consequente fusão para soldagem. Fortes (2005) cita que a velocidade de alimentação do arame está diretamente relacionada à corrente de soldagem, desde que a extensão do eletrodo seja sempre constante, esta relação é denominada

característica de queima. Segundo Fortes (2005), quando a velocidade de alimentação do arame é alterada, a corrente de soldagem varia no mesmo sentido.

Na Figura 8, é possível observar a relação entre a intensidade de corrente e velocidade de alimentação do arame.



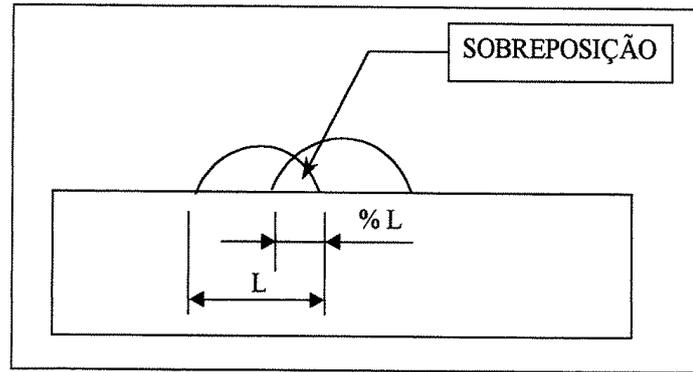
**Figura 8 - Característica de queima**

Fonte – Gimenes Junior et al (2012, p. 1)

Silva, Braga e Ferraresi (2011) fixaram a velocidade de alimentação do arame em 6 m/min. Silva Junior et al (2011) variaram entre 4 m/min e 8 m/min, e após realizar diversos ensaios buscando um bom aspecto superficial, concluíram que a melhor qualidade foi obtida ao utilizar uma velocidade de alimentação de 6 m/min.

#### 2.4.4 Sobreposição dos cordões

A sobreposição é definida como a razão com que um cordão sobrepõe o outro. Este fator determina quantos passes deverão ser executados, para que seja retirado o mínimo possível de material se for necessário executar uma operação posterior (Ex, usinagem). A Figura 9 ilustra a sobreposição de cordões de solda.



**Figura 9 - Sobreposição dos cordões de solda**

**Fonte - Corrêa (2000, p.16)**

Corrêa (2000) analisou a sobreposição de cordões de solda, variando entre 20 e 50%, sendo que entre 40% e 50% não foram obtidos cordões uniformes e com 20% de sobreposição haviam espaços vazios entre os cordões, chegando à conclusão que a sobreposição de 30% apresentou os melhores resultados. Braga, Silva e Ferraresi (2011) variaram entre 50% e 60%.

#### 2.4.5 Distância eletrodo-peça

A distância eletrodo-peça também é chamada de distância bico-peça, devido à dificuldade de se medir a distância entre a peça e o arame que será depositado.

Ao realizar o levantamento bibliográfico foi possível verificar que poucos autores analisaram a influência da distância bico-peça. Também verificou-se que alguns trabalhos que descreviam os resultados obtidos pela variação da distância bico-peça não poderiam ser generalizados para todo tipo de soldagem de revestimento, devido a utilizarem o processo de soldagem *MIG* com adição de arame frio ou com arame tubular.

Corrêa (2000) salienta que quanto maior for a distância, maior será o aquecimento do arame por efeito Joule, e pode ser usado para aumentar a taxa de deposição, respeitando alguns limites.

Silva Junior et al (2011) fixaram em 14 mm. Corrêa (2000) fixou em 10 mm. Brantis (1993) variou de 8 mm a 12 mm. Silva, Braga e Ferraresi (2011) variaram entre

15 mm e 17 mm, sendo que neste trabalho chegou-se à conclusão que a distância de 16 mm foi a que apresentou melhores resultados.

#### 2.4.6 Ângulo de soldagem

Conforme o tipo de transferência metálica, varia a técnica de soldagem, assim como os ajustes da pistola. Segundo Corrêa (2000, p. 16), a orientação da tocha em relação ao plano do cordão de solda é definida por dois ângulos:

- Ângulo de trabalho: é definido pelo plano perpendicular à linha de simetria do cordão e perpendicular ao plano de soldagem;
- Ângulo de deslocamento: é definido pelo plano paralelo à linha de simetria do cordão e perpendicular ao plano de soldagem.

Na Figura 10, são descritos os ângulos de trabalho durante o processo de soldagem.

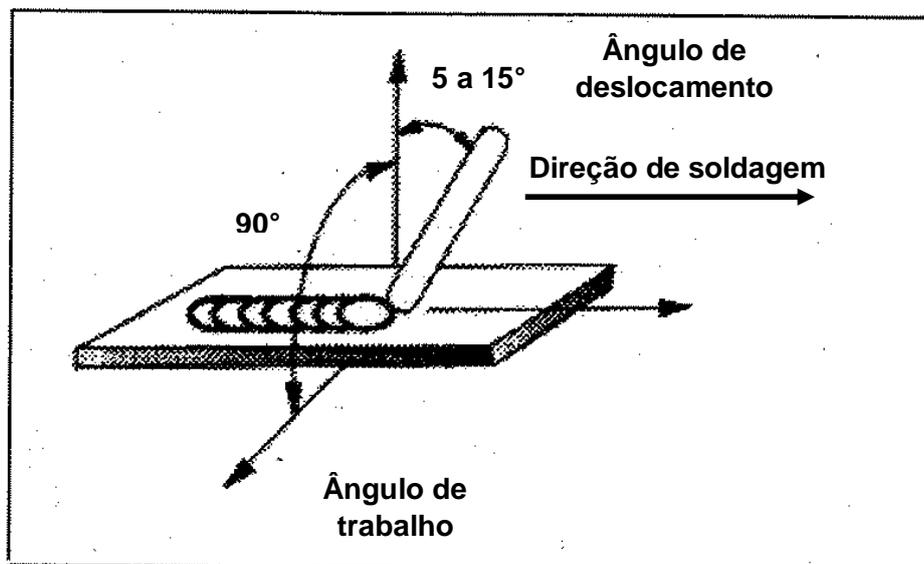


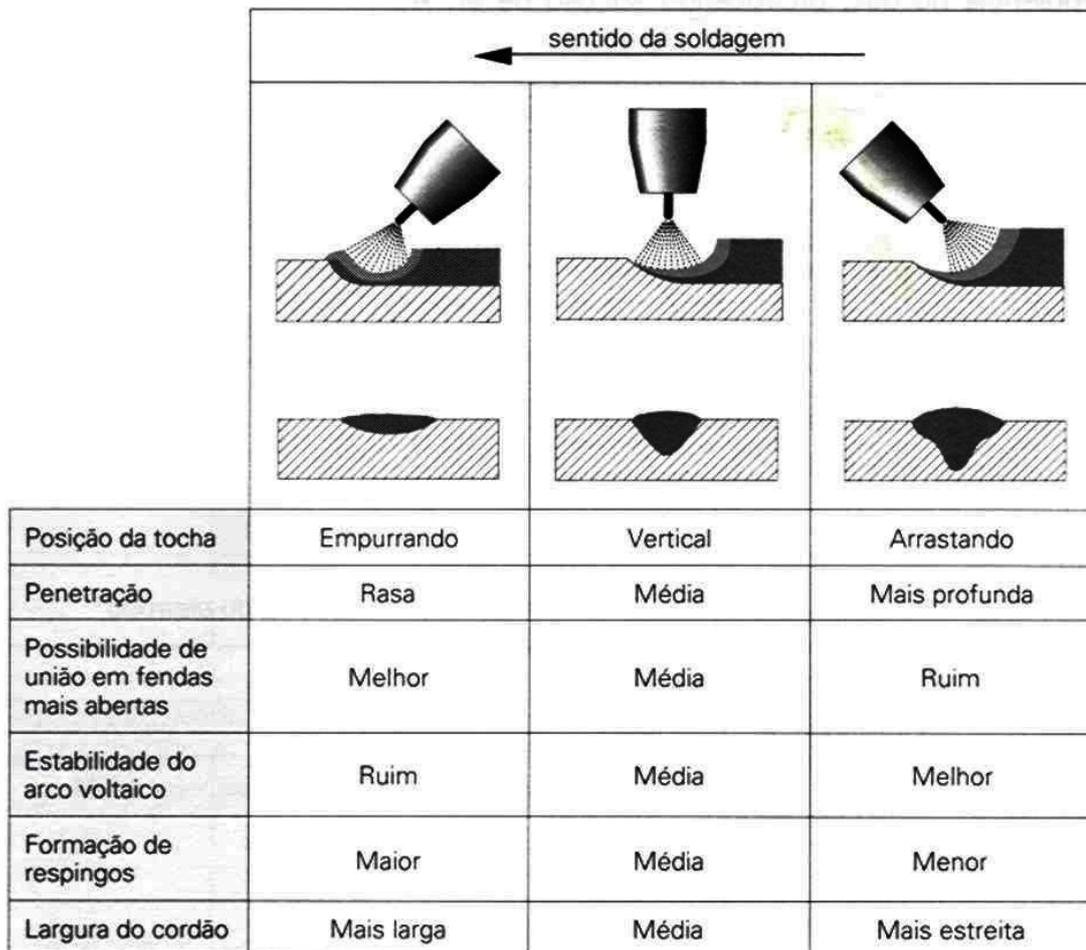
Figura 10 - Ângulos de deslocamento da tocha

Fonte - Corrêa (2000, p. 17)

Gimenes Junior et al (2012), informa que a inclinação da tocha influencia na largura, na altura e na penetração do cordão de solda.

Na Figura 11, é possível observar que, se a tocha é inclinada para a esquerda, o cordão de solda passa a ter pequena penetração e cordão mais largo. No caso de

a tocha estar inclinada para a direita, o cordão se torna estreito e com grande penetração.



**Figura 11 - Comparação entre ângulos de soldagem**

Fonte – Gimenes Junior et al (2012, p. 1)

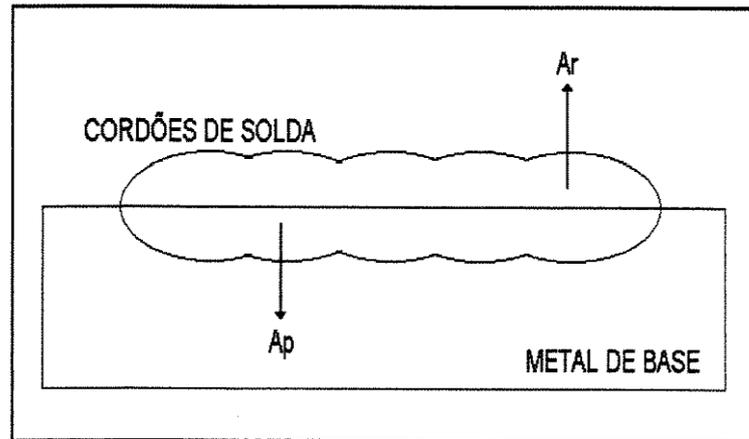
Brantis (1993) fixou o ângulo da tocha em  $90^\circ$ . Silva, Braga e Ferraresi (2011) fixaram em  $15^\circ$  empurrando. Corrêa (2000) variou entre  $60^\circ$  a  $90^\circ$  empurrando, sendo que após realizar análises ficou constatado que o ângulo de  $15^\circ$  empurrando forneceu os melhores resultados neste trabalho.

## 2.5 INFLUÊNCIA DA DILUIÇÃO NAS PROPRIEDADES

Em alguns procedimentos de soldagem não são depositados metais com as mesmas especificações que o metal base. Em soldagem de revestimento o material depositado deve obter propriedades mecânicas melhores do que o metal de base, por

isso é de extrema importância conhecer e controlar a diluição do metal de adição no metal base.

Segundo Corrêa (2000), a diluição é definida como a relação entre a área fundida do metal de base, sendo esta a área de penetração ( $A_p$ ) e a área de reforço ( $A_r$ ), que são ilustradas na Figura 12.



**Figura 12 - Diluição do metal de adição**

**Fonte - Corrêa (2000, p. 18)**

A diluição pode ser calculada através da equação (1):

$$D = [ A_p / ( A_p + A_r ) ] * 100 \quad (\%) \quad (1)$$

Onde:

D é a diluição (%)

$A_p$  é a área de penetração ( $\text{mm}^2$ )

$A_r$  é a área de reforço ( $\text{mm}^2$ )

Gomes (2010) argumenta que a diluição é influenciada por variáveis como corrente, tensão e velocidade de soldagem. Em sua pesquisa, Corrêa (2000) afirma que a diluição é diretamente proporcional à corrente e inversamente proporcional à velocidade de soldagem e ao diâmetro do eletrodo.

Para evitar que o revestimento perca as propriedades mecânicas desejadas, a diluição deve ser minimizada. Murugan e Parmar (1997) estabelecem que a diluição não deve ser menor do que 10% e 15%. Gomes (2010) afirma que estes valores mínimos devem ser respeitados para permitir que a união entre o metal base e o metal de adição tenha resistência. Wainer (1992), mostra que a diluição esperada deve ser entre 10% e 50%.

## 2.6 CARACTERÍSTICAS DE DESEMPENHO DO PROCESSO DE REVESTIMENTO

A seleção adequada de parâmetros de soldagem deve garantir características do processo satisfatórias e um alto rendimento. Fatores como o rendimento real (Rend), a taxa de deposição (TD) e a taxa de fusão (TF), definem o desempenho econômico do processo de soldagem.

O rendimento real é definido como a razão entre a massa do arame depositada ao metal base e a massa de arame consumida durante o processo de soldagem, como mostra a equação (2):

$$\text{Rend} = [ ( M_f - M_i ) / m_a ] * 100 \text{ (\%)} \quad (2)$$

E a massa do arame é definida pela equação (3):

$$m_a = \rho * L \quad (3)$$

Onde:

$\rho$  é a densidade do arame (g/m)

$L$  é o comprimento utilizado de arame (m)

$M_f$  é a massa final da chapa (g)

$M_i$  é a massa inicial da chapa (g)

$m_a$  é a massa de arame consumida (g)

A taxa de deposição (TD) é definida pela massa de arame realmente adicionada ao metal de base por unidade de tempo, calculada com a equação (4):

$$TD = [ 3,6 \cdot ( M_f - M_i ) ] / t \quad (4)$$

Onde:

$t$  é o tempo de soldagem (s)

A taxa de fusão (TF) é definida como a razão entre a massa de arame fundida e o tempo de soldagem, calculada com a equação (5):

$$TF = ( 3,6 \cdot p \cdot L ) / t \quad (5)$$

Onde:

$p$  é a densidade do arame (g/m)

$L$  é o comprimento utilizado de arame (m)

### 3 MATERIAIS E MÉTODOS

A seguir, serão descritos os materiais utilizados nos experimentos.

#### 3.1 MATERIAIS

Os corpos de prova utilizados nos experimentos foram chapas de aço ABNT 1020, com 150 mm de comprimento, 30 mm de largura e 5 mm de espessura. O aço ABNT 1020 possui a composição química apresentada na Tabela 1, fornecida pelo fabricante.

**Tabela 1 - Composição química do aço ABNT 1020**

Limite	Carbono	Manganês	Fósforo	Enxofre
Mínimo	0,18	0,30	-	-
Máximo	0,23	0,60	0,04	0,05

Fonte – CIAFAL (2009)

Durante os experimentos foi utilizado como metal de adição o arame de aço inoxidável AWS ER309L, com diâmetro de 1,2 mm. A composição química deste arame é apresentada na Tabela 2, fornecida pelo fabricante.

**Tabela 2 - Composição química do arame de aço inoxidável AWS ER309L**

Limite	Carbono	Cromo	Níquel	Manganês	Silício
Mínimo	-	23	12	1	0,3
Máximo	0,03	25	14	2,5	0,65

Fonte – NICROSOL (2013)

## 3.2 MÉTODOS

Para evitar realizar a soldagem com impurezas e evitar erros de medida de massa, cada corpo de prova passou por lixamento e limpeza. Cada chapa foi identificada, e a massa foi medida antes dos experimentos. Ao todo foram cortadas 13 chapas de aço ABNT 1020 para realização dos experimentos definitivos.

Também foi necessário conhecer a densidade do arame. Para tanto, foram cortadas 10 amostras de 200 mm cada. Foi realizada a medição da massa dessas amostras e posterior cálculo da média destas massas.

Os dados das chapas e do arame serão utilizados nos cálculos das características econômicas.

### 3.2.1 Parâmetros constantes

Para definir os níveis dos parâmetros que serão utilizados nos experimentos, foram pesquisados dados utilizados por outros autores citados no levantamento bibliográfico. Todos os experimentos serão realizados com base em fontes como Silva, Braga e Ferraresi (2011), Corrêa (2000), Brantis (1993) e Silva Junior et al (2011). Foram fixados os parâmetros apresentados na Tabela 3.

**Tabela 3 - Parâmetros mantidos constantes**

Parâmetro	Nível/Unidade
Posição de soldagem	15° (empurrando)
Distância Bico-Peça	14 mm
Gás de Proteção	Ar (15 l/min)

**Fonte – Autoria própria**

Estes parâmetros foram fixados em níveis que apresentaram resultados considerados satisfatórios pelos autores citados.

### 3.2.2 Parâmetros variáveis

Os parâmetros variáveis foram divididos em 2 níveis, representados por nível (0) e nível (1), permitindo a verificação de quais níveis apresentam melhores resultados. Os parâmetros e níveis são apresentados na Tabela 4.

**Tabela 4 - Parâmetros variáveis**

Parâmetro	Nível (0)	Nível (1)
Tensão de soldagem (V)	25	27
Velocidade de alimentação do arame (m/min)	6	8
Velocidade de soldagem (cm/min)	26	30

**Fonte – Autoria própria**

Os níveis dos parâmetros foram definidos de acordo com as fontes consultadas, das quais foram analisados os resultados obtidos, definindo quais os limites de níveis apresentaram resultados satisfatórios.

### 3.3 PLANEJAMENTO DOS EXPERIMENTOS

Para determinar o número de ensaios a serem realizados, foram feitas todas as combinações possíveis das três variáveis. As combinações que foram seguidas nos experimentos são apresentadas na Tabela 5.

**Tabela 5 - Combinação de experimentos**

**(continua)**

Experimento	Tensão de soldagem (V)	Velocidade de alimentação do arame (m/min)	Velocidade de soldagem (cm/min)
1	25	6	26
2	25	8	26
3	25	6	30

**Tabela 6 - Combinação de experimentos**

				<b>(conclusão)</b>
Experimento	Tensão de soldagem (V)	Velocidade de alimentação do arame (m/min)	Velocidade de soldagem (cm/min)	
4	25	8	30	
5	27	6	26	
6	27	8	26	
7	27	6	30	
8	27	8	30	

**Fonte – Autoria própria**

Foram analisados todos os experimentos, permitindo identificar qual a influência de cada parâmetro na geometria do cordão de solda.

Após determinar qual a combinação de parâmetros que gera a melhor geometria do cordão de solda, foram feitos mais ensaios para analisar qual é a melhor sobreposição dos cordões de solda, a sequência seguida nos experimentos é descrita na Tabela 6.

**Tabela 7 - Experimentos para análise de sobreposição**

Experimento	Sobreposição (%)
9	20
10	30
11	40
12	50

**Fonte – Autoria própria**

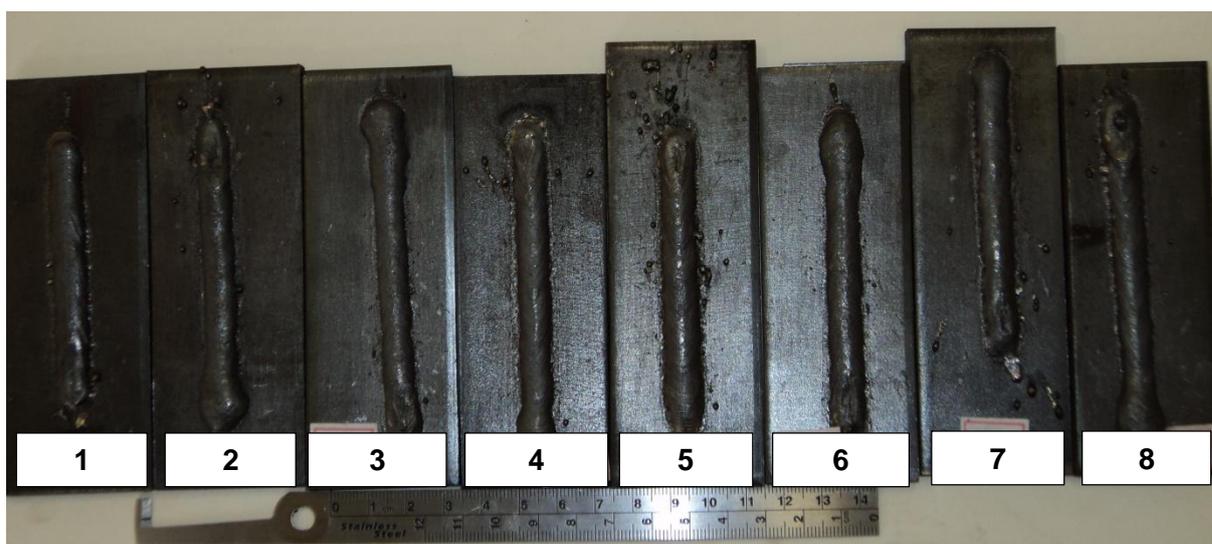
Esta faixa de sobreposição abrange todas as sobreposições realizadas pelos autores citados no levantamento bibliográfico.

### 3.4 EXECUÇÃO DOS EXPERIMENTOS

A seguir, serão descritos quais métodos foram empregados para realização dos experimentos.

#### 3.4.1 Determinação da combinação de parâmetros

Para determinar qual a combinação de parâmetros que gera a melhor geometria do cordão de solda, foi feita a deposição de um único cordão de solda em cada chapa de aço carbono, seguindo as combinações mostradas na Tabela 6. Para tanto, foi utilizado um equipamento de solda *MIG*, da marca SMASHWELD, modelo 315 TOPFLEX. Os experimentos para determinação da melhor combinação de parâmetros são ilustrados na Figura 13.



**Figura 13 - Experimentos para determinação da melhor combinação de parâmetros**

**Fonte - Autoria própria**

É possível observar na Figura 13, que todos os experimentos apresentaram bom acabamento superficial, com pouca geração de respingos.

Para efetuar os cálculos das características econômicas, cada chapa foi identificada e teve sua massa medida em uma balança de precisão, da marca PRECISION, modelo PA500. A medida das massas das chapas foi feita antes e depois

da deposição de cada cordão de solda, permitindo conhecer a massa de metal que foi realmente depositado nas chapas de aço carbono.

Durante os experimentos, foram adquiridos os dados de tensão e corrente, utilizando o *software LabView Signal Express 2010*, que permite gerar gráficos de tensão e corrente. Os dados foram coletados a cada milésimo de segundo, permitindo realizar uma análise mais detalhada do processo de revestimento.

Foi adquirido o tempo de soldagem de cada experimento, utilizando um cronômetro digital, da marca SAMSUNG. Estes dados permitem realizar os cálculos de características econômicas.

### 3.4.2 Análise metalográfica

Foram realizadas análises metalográficas, que permitem identificar e medir a geometria do cordão de solda, possibilitando medir a largura e a altura do cordão, bem como a área de penetração e a área de reforço. Com estes valores foi possível calcular a diluição do revestimento no metal base.

Para permitir a análise das amostras, foram feitos cortes perpendiculares à linha do cordão de solda, representados em vermelho na Figura 14, para depois realizar cortes paralelos ao cordão, representados em amarelo na Figura 14. Para tanto, foi utilizada uma máquina para corte de corpos de prova, da marca METALOTEST, modelo MAXICUT, reduzindo a amostra a um tamanho possível de ser embutido para preparação metalográfica, como mostra a Figura 14.

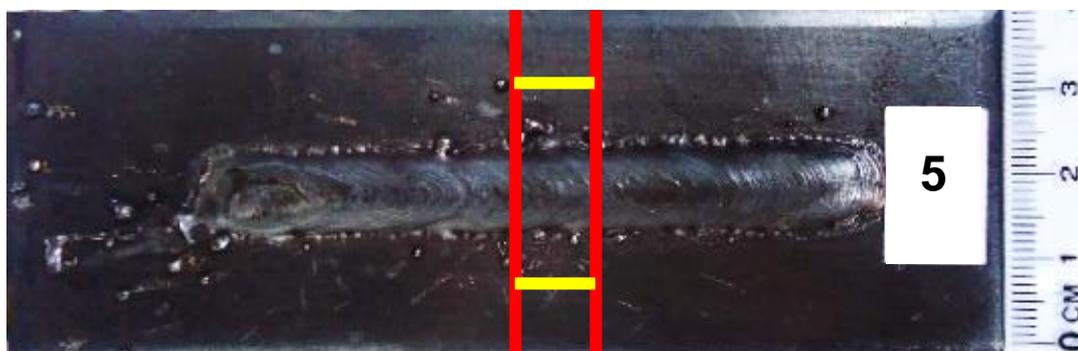


Figura 14 - Localização dos cortes

Fonte - Autoria própria

Após realizar os cortes, as amostras foram embutidas, utilizando uma máquina para embutimento de corpos de prova da marca METALOTEST, modelo MAXIPRESS. No embutimento, primeiro foi depositado na máquina 4 gramas de baquelite da marca AROTEC, tipo BACC, que é mais duro e evita o empenamento das amostras durante a preparação metalográfica. Depois foram depositadas 9 gramas de baquelite da marca AROTEC, tipo PRETO.

Depois de depositar os baquelites, foi aplicada uma pressão de 100 Kgf/cm<sup>2</sup> durante 10 minutos, dando fim a etapa de embutimento.

Após a etapa de embutimento, todos os corpos de prova foram lixados na máquina lixadeira da marca FORTEL, modelo PLF, utilizando discos de lixas metalográficas, seguindo a sequência de granulometrias A220; A320; A400; A600 e P1200.

Em seguida, as amostras foram polidas numa politriz da marca AROTEC, na qual era depositada Alumina em suspensão líquida para polimento de amostras metalográficas, seguindo a sequência de granulometria de 1,0  $\mu\text{m}$  e 0,3  $\mu\text{m}$ .

Para garantir um acabamento de maior qualidade, depois da etapa de polimento manual, estas foram depositadas numa polidora vibratória da marca BUEHLER, modelo *VIBROMET VIBRATORY POLISHER*, na qual as amostras foram polidas durante 5 horas.

Após a etapa de polimento, foi realizado um ataque químico, utilizando Nital (ácido nítrico e álcool), onde as amostras foram mergulhadas durante 20 segundos, diferenciando o metal base do metal de adição, a fim de facilitar a análise.

Depois de preparadas, as amostras foram analisadas em microscópio estereoscópico, da marca MOTIC, modelo MLC – 150C. Utilizando o *software MOTIC IMAGES PLUS 2.0 ML*, foram captadas as imagens geradas pelo microscópio.

Para analisar as imagens foi utilizado o *software IMAGE-PRO EXPRESS*, onde foram feitas medidas da largura e altura, bem como da área de penetração e área de reforço.

Com os dados das características econômicas aqusitados, estes foram tratados e analisados, utilizando o *software Microsoft Excel*.

### 3.4.3 Determinação da sobreposição

Depois de definir qual é a combinação de parâmetros que gera a melhor geometria de cordão, esta foi fixada. Utilizando esta combinação, foram feitos novos experimentos para determinar qual é a melhor sobreposição de cordões.

Nos experimentos para determinação da sobreposição de cordões, foram depositados 3 cordões paralelamente, sendo que a tocha só era deslocada lateralmente sem alterar nenhum outro parâmetro.

A sequência destes experimentos seguiu a combinação mostrada na Tabela 6, com um total de 4 experimentos.

Após realizar estes experimentos, a etapa de análise metalográfica foi repetida para estas novas amostras, permitindo conhecer qual é a melhor sobreposição de cordões.

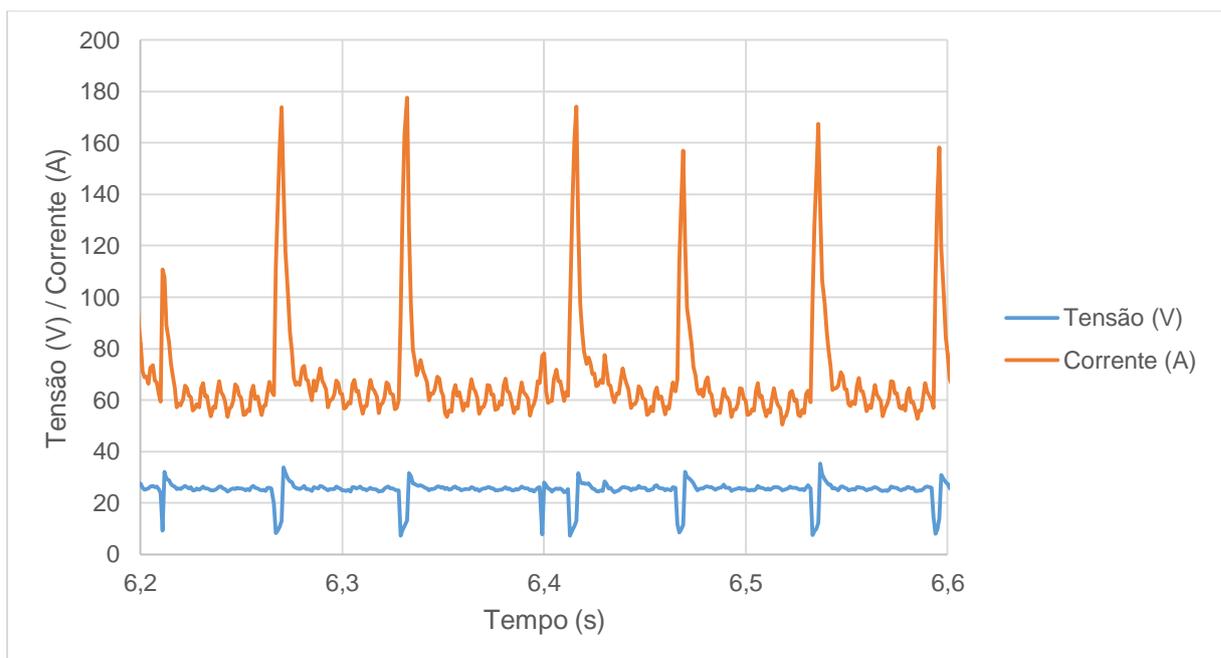
## 4 RESULTADOS

Após realizar os experimentos e analisar as imagens no microscópio estereoscópico, foi possível identificar a influência que os parâmetros de soldagem têm sobre a geometria do cordão.

Nesta seção da pesquisa, primeiro serão descritas as influências dos parâmetros nos cordões de solda, e como foi escolhida a combinação de parâmetros que gerou a melhor geometria do cordão. Após determinar a melhor geometria de cordão de solda, serão apresentados os resultados obtidos com a realização da análise da sobreposição dos cordões.

### 4.1 ANÁLISE DA INFLUÊNCIA DA TENSÃO NO PROCESSO DE REVESTIMENTO

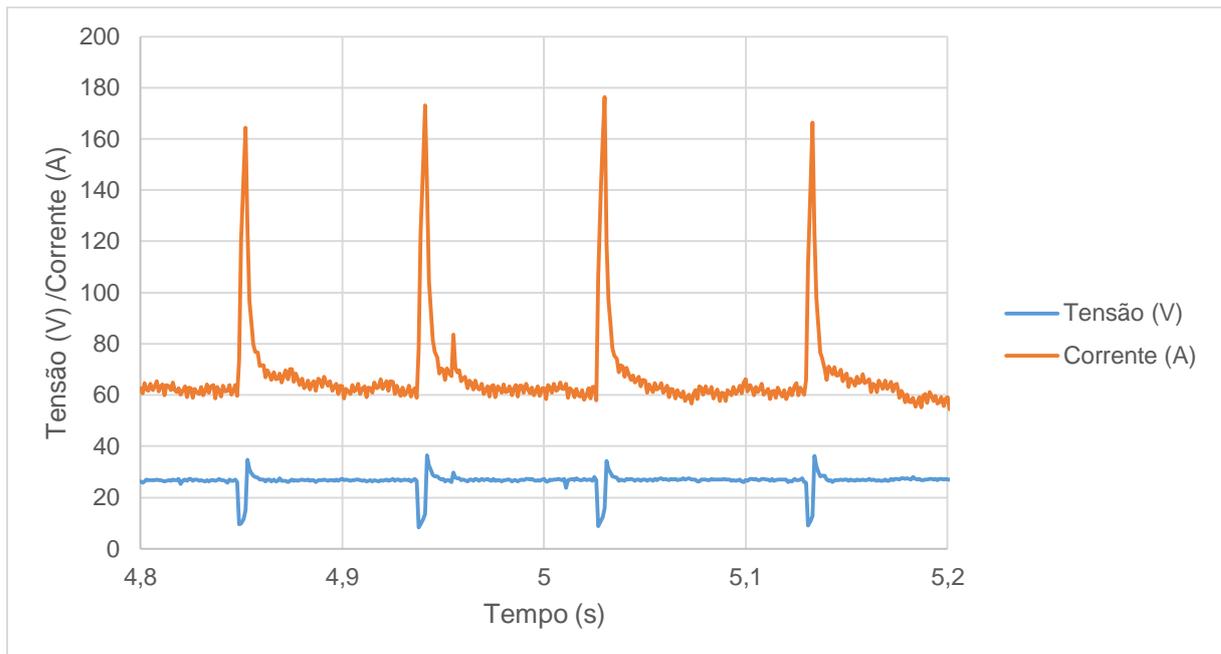
Foram feitos experimentos utilizando tensões de aproximadamente 25 e 27 V. O oscilograma do experimento 1, que utiliza tensão de 25 V e velocidade de alimentação de arame de 6 m/min, é mostrado no Gráfico 1.



**Gráfico 1 - Oscilograma de tensão e corrente de soldagem do experimento 1**

**Fonte - Autoria própria**

A transferência metálica do experimento 1 foi globular, sendo possível verificar uma certa instabilidade da tensão e da corrente no Gráfico 1. No Gráfico 2, é apresentado o oscilograma do experimento 5, que possui os mesmos parâmetros do experimento 1, aumentando somente a tensão de soldagem de 25 V para 27 V.

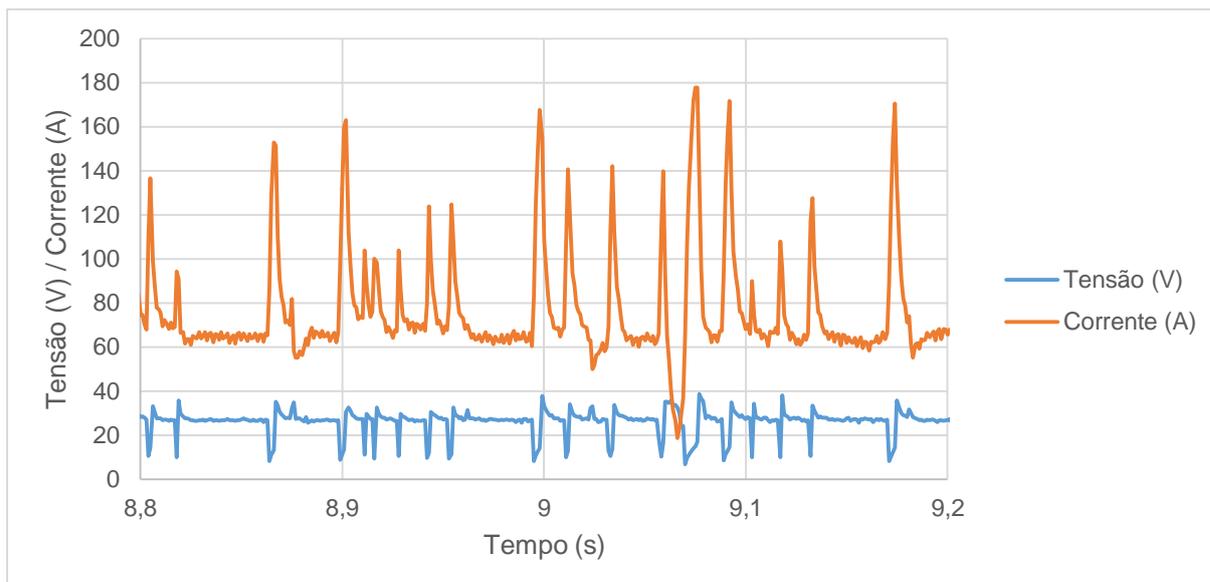


**Gráfico 2 - Oscilograma de tensão e corrente de soldagem do experimento 5**

**Fonte - Autoria própria**

O modo de transferência metálica do experimento 5 foi globular, porém, com o aumento da tensão, é verificado que existe maior estabilidade da tensão e da corrente, se comparado ao experimento 1, mostrado no Gráfico 1. Este aumento da estabilidade se deve à tendência de atingir a transferência por aerossol com o aumento da tensão.

No Gráfico 3, é apresentado o oscilograma do experimento 6, que utiliza os mesmos parâmetros do experimento 5, aumentando somente a velocidade de alimentação do arame para 8 m/min.



**Gráfico 3 - Oscilograma de tensão e corrente de soldagem do experimento 6**

**Fonte - Autoria própria**

Ao realizar as comparações entre os Gráficos 2 e 3, é possível verificar que o aumento da velocidade de alimentação do arame, implica em maior instabilidade da tensão de solda. Esta instabilidade da tensão com o aumento da velocidade de arame foi observada em todos os experimentos.

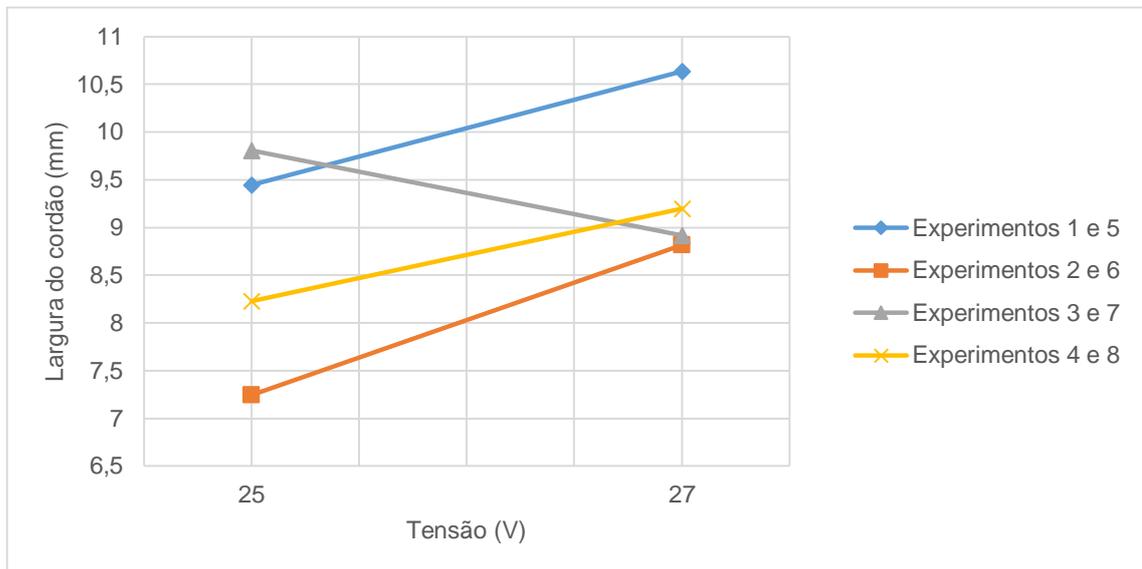
#### 4.1.1 Influência da tensão na largura do cordão

Para poder analisar qual foi a influência que a tensão tem sobre a largura do cordão, foram formados pares de experimentos, sendo que estes possuem as mesmas velocidades de alimentação do arame e mesmas velocidades de soldagem. Assim, em cada linha mostrada no Gráfico 4, foi variada somente a tensão de soldagem.

Por exemplo, na linha azul do Gráfico 4, foi analisada a influência da tensão na largura, dos experimento 1 e 5, sendo que estes experimentos possuem as mesmas velocidades de alimentação do arame e mesmas velocidades de soldagem, variando somente a tensão.

Esta metodologia de análise foi adotada nos outros gráficos que serão mostrados na sequência.

No Gráfico 4, é ilustrada a influência da tensão na largura do cordão, na qual a tensão foi variada em 25 e 27 V.



**Gráfico 4 - Influência da tensão na largura do cordão**

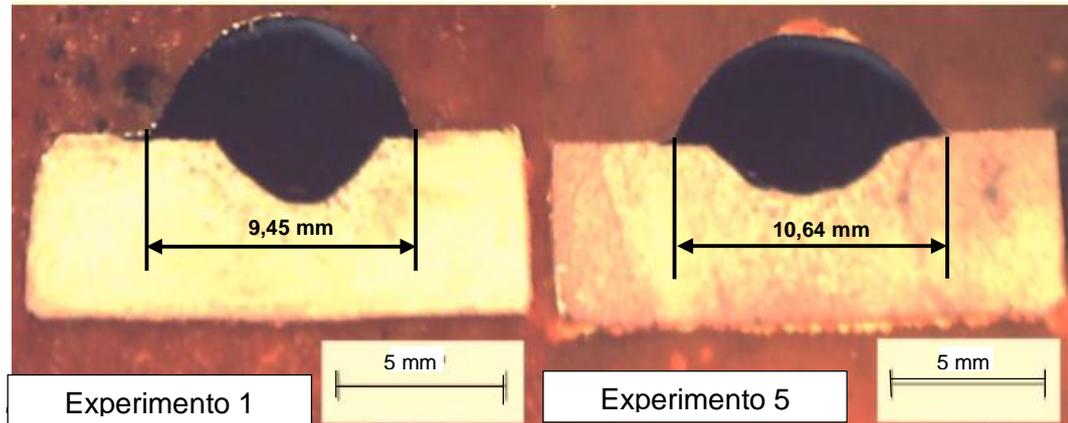
**Fonte - Autoria própria**

No Gráfico 4, é possível verificar que quando ocorre o aumento da tensão de soldagem, existe uma tendência de aumento na largura do cordão. Esta tendência pode ser verificada na maioria dos experimentos, com exceção dos experimentos 3 e 7.

Este comportamento era esperado, segundo fonte consultadas na revisão bibliográfica, como Gimenes Junior et al (2012), Gomes (2010) e Corrêa (2000), o aumento da tensão provoca um aumento na largura do cordão.

As tabelas com os valores de largura e altura do cordão são apresentados nas características geométricas, nas Tabelas 10 e 11.

Na Figura 15, pode ser observado a diferença de largura entre os experimentos 1 e 5. No experimento 1, a tensão utilizada foi de 25 V, e no experimento 5, a tensão utilizada foi 27 V.



**Figura 15 - Comparação de largura dos cordões com a variação da tensão**

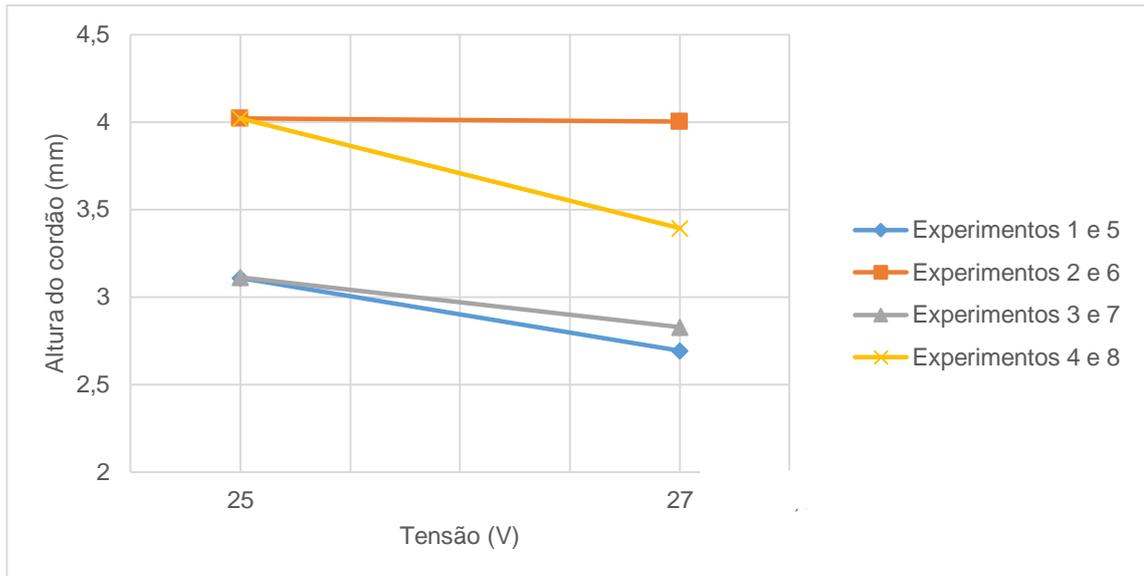
**Fonte - Autoria própria**

Observando o Gráfico 4, e a Figura 15, verifica-se que, o aumento da tensão provoca o aumento da largura do cordão, o que é benéfico nesta pesquisa, pois com o aumento da largura do cordão é possível cobrir uma área maior a cada cordão depositado.

#### 4.1.2 Influência da tensão na altura do cordão

Seguindo a mesma metodologia de análise, foram criados pares com os mesmos parâmetros, variando somente a tensão, a fim de verificar a influência da tensão na altura do cordão.

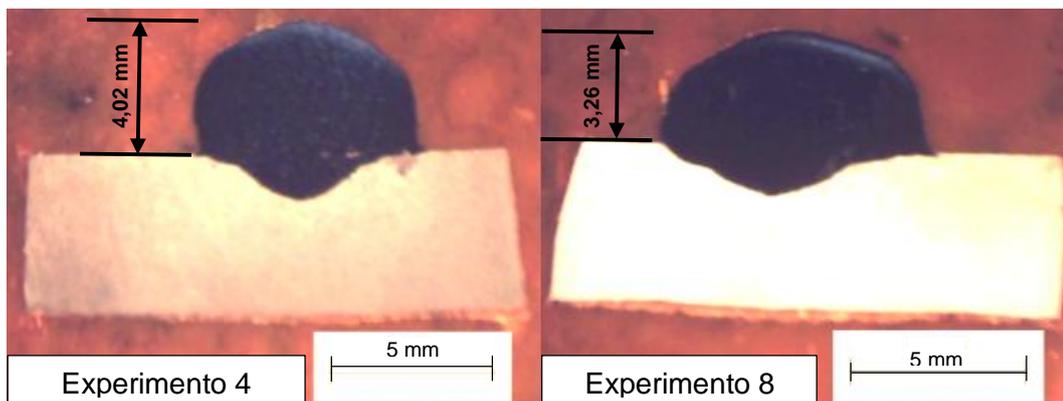
No Gráfico 5, é ilustrada a influência que a tensão tem na altura do cordão, a tensão foi variada em 25 e 27 V.



**Gráfico 5 - Influência da tensão na altura do cordão**

Fonte - Autoria própria

Pode ser observado no Gráfico 5 que, quando ocorre um aumento na tensão de soldagem, existe uma tendência de diminuir a altura do cordão de solda. Isto pode ser verificado na Figura 16, que mostra a comparação entre os experimentos 4 e 8.



**Figura 16 - Comparação da altura dos cordões com a variação da tensão**

Fonte - Autoria própria

Em certos casos, esta redução na altura do cordão também é buscada em processos de revestimento, pois consome menos metal de adição para cobrir a área

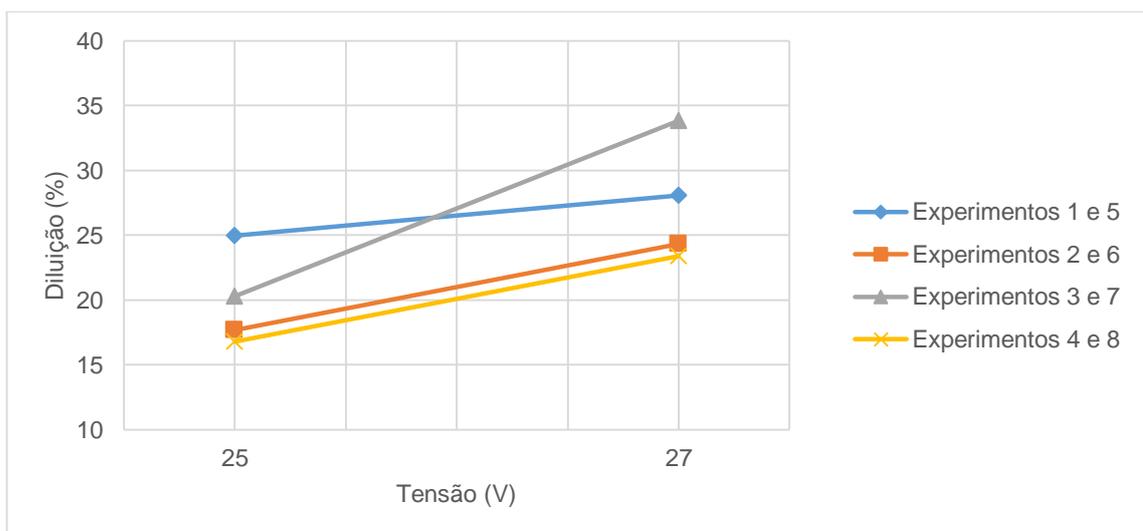
desejada, bem como necessita de retirada de menos material em processos posteriores, como na usinagem ou lixamento.

A redução da altura do cordão com o aumento da tensão era esperada, de acordo com Gimenes Junior et al (2012), Gomes (2010) e Brantis (1993), o aumento da tensão reduz a altura do cordão. Porém, o aumento excessivo da tensão pode causar porosidade, salpicos e mordeduras. Por outro lado, tensões muito baixas provocam porosidade e cordões com alto ângulo de molhabilidade.

#### 4.1.3 Influência da tensão na diluição

A diluição é um aspecto importante em soldagem de revestimento, sendo que esta deve estar dentro de limites aceitáveis. Estes limites foram estabelecidos nesta pesquisa, levando em consideração os dados levantados na revisão de literatura, que estabelecem que a diluição não deve ser menor do que 15 %, para garantir a união dos metais, e não deve ser maior do que 50 %, para evitar a perda de propriedades mecânicas do metal de adição.

No Gráfico 6, é ilustrada a tendência que a tensão tem na diluição dos cordões de solda.

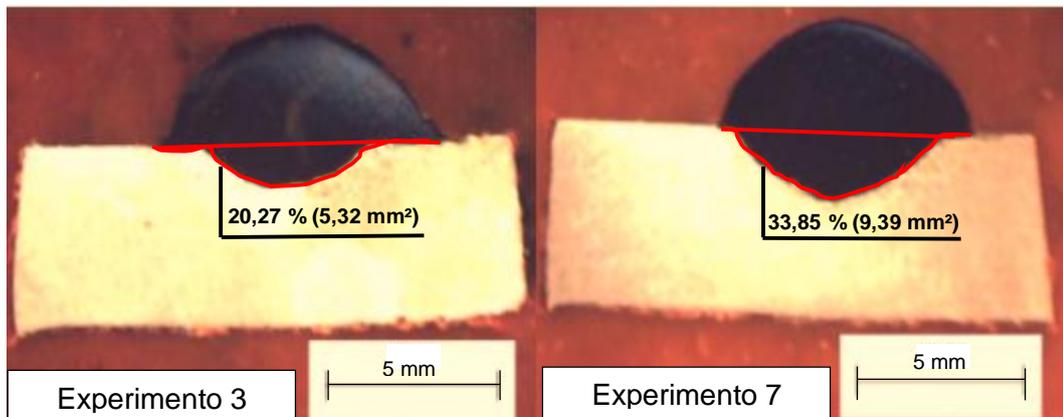


**Gráfico 6 - Influência da tensão na diluição**

**Fonte - Autoria própria**

É possível observar que, a tensão e a diluição são diretamente proporcionais, ou seja, quando existe um aumento da tensão, também ocorre o aumento da diluição. Porém, a diluição de todos os experimentos ficaram dentro dos limites estabelecidos na revisão bibliográfica. Murugan e Parmar (1997) estabelecem que a diluição não deve ser menor do que 10 % e 15 %, a fim de garantir a união entre o metal base e o metal de adição, bem como Wainer (1992) cita que a diluição esperada deve estar entre 10 % e 50 %.

Na Figura 17, é ilustrada a comparação entre os experimentos 3 e 7.



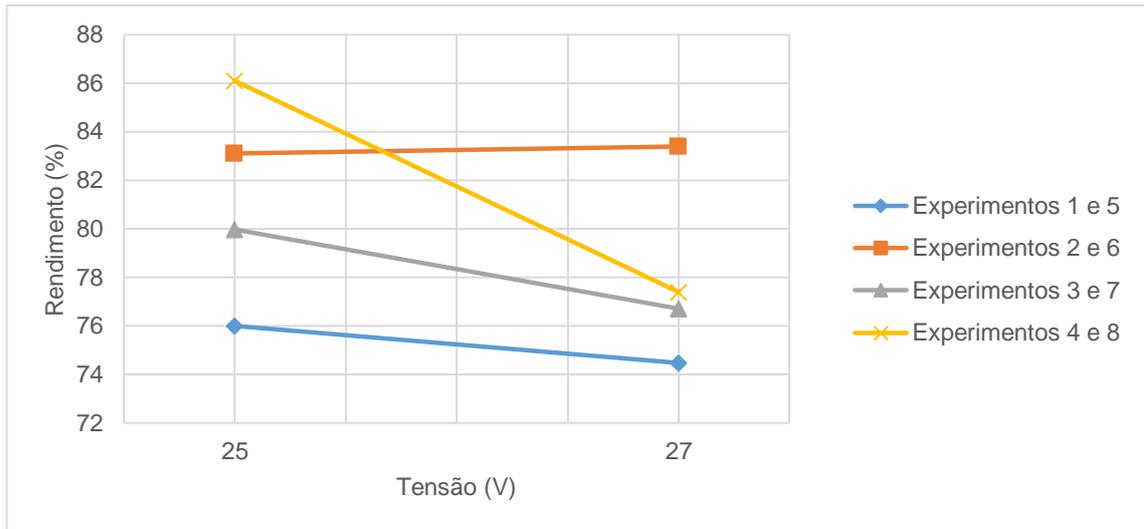
**Figura 17 - Comparação da diluição dos cordões com a variação da tensão**

**Fonte - Autoria própria**

Na Figura 17, é possível observar o aumento da diluição com o aumento da tensão.

#### 4.1.4 Influência da tensão no rendimento

O rendimento real é definido como a razão entre a massa do arame depositada ao metal base e a massa de arame consumida durante o processo de soldagem. No Gráfico 7, é ilustrada a influência da tensão no rendimento do processo.



**Gráfico 7 - Influência da tensão no rendimento**

**Fonte - Autoria própria**

É possível observar que, com o aumento da tensão, existe uma tendência de queda no rendimento do processo.

Os dados sobre o rendimento de cada experimento, serão mostrados na seção sobre os resultados das características econômicas do processo.

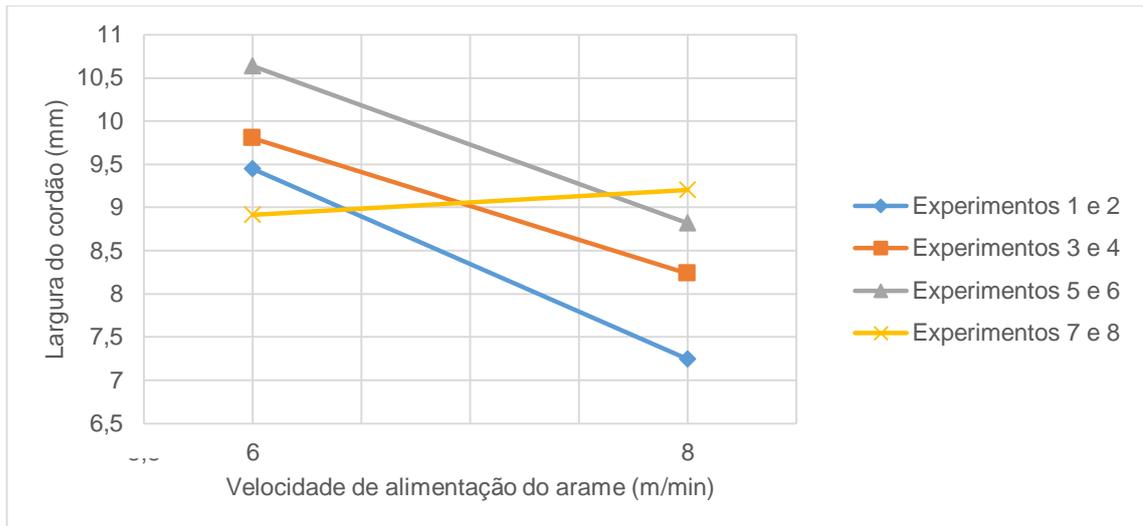
#### 4.2 ANÁLISE DA INFLUÊNCIA DA VELOCIDADE DE ALIMENTAÇÃO DO ARAME NO PROCESSO DE REVESTIMENTO

A velocidade de alimentação do arame é definida como a velocidade com que o arame é fornecido à tocha, e conseqüente fusão para soldagem.

A seguir serão descritas as influências que a velocidade de alimentação do arame tem sobre a geometria, diluição e características econômicas dos experimentos realizados.

#### 4.2.1 Influência da velocidade de alimentação do arame na largura do cordão

Na Gráfico 8, é ilustrado qual é a influência da velocidade de alimentação do arame na largura do cordão.

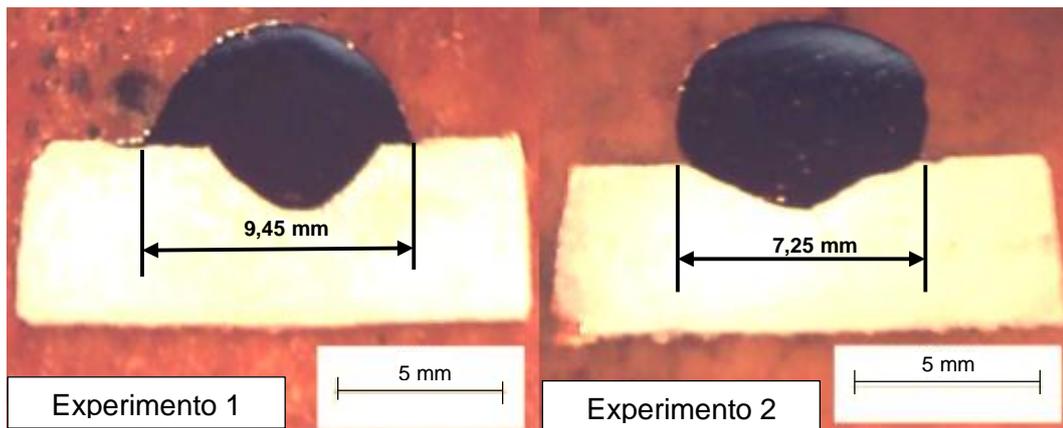


**Gráfico 8 - Influência da velocidade de alimentação do arame na largura do cordão**

**Fonte - Autoria própria**

Observando o Gráfico 8, verifica-se que quando a velocidade de alimentação do arame é aumentada, existe uma tendência de diminuição na largura do cordão. Em sua pesquisa, Silva Junior et al (2011) haviam chegado à conclusão que a velocidade de alimentação de arame de 8 m/min não resultava na geometria desejada, gerando cordões estreitos e altos, chegando à conclusão que a velocidade de arame mais adequada era a de 6 m/min.

A Figura 18, mostra a comparação entre os experimentos 1 e 2, ilustrando a diminuição da largura do cordão com o aumento da velocidade de alimentação do arame.



**Figura 18 - Comparação da largura dos cordões com a variação da velocidade de alimentação do arame**

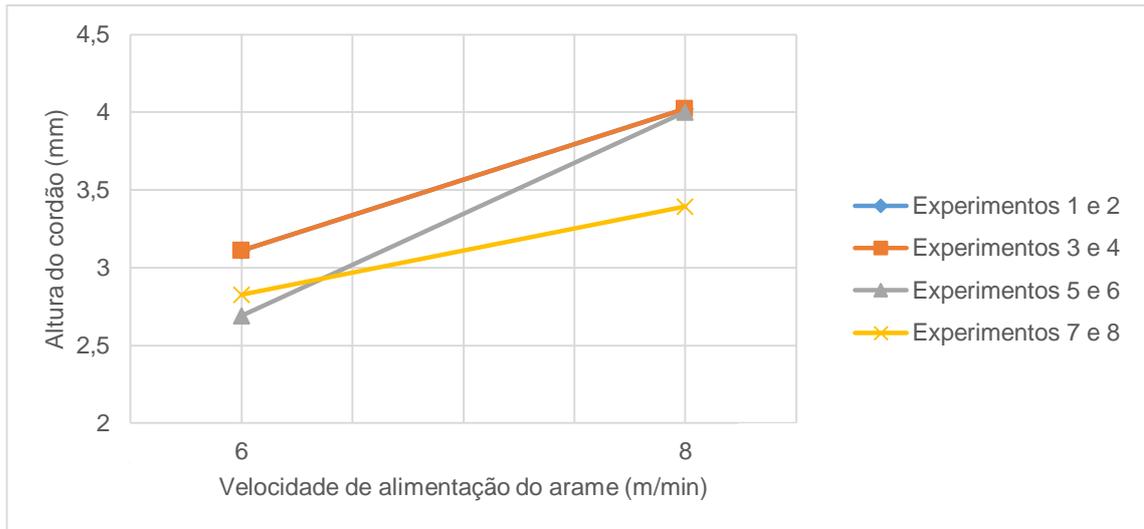
**Fonte - Autoria própria**

Na Figura 18, é possível observar que o cordão de solda do experimento 2 tem alto ângulo de molhabilidade, não adequado para o processo de revestimento, pois ao depositar o segundo cordão, ficariam espaços vazios, ocasionando falhas.

Como explicado anteriormente, quanto mais largo for o cordão, melhor. É possível concluir que o aumento da velocidade de arame não é adequado, se mantidos os outros parâmetros fixos.

#### 4.2.2 Influência da velocidade de alimentação do arame na altura do cordão

No Gráfico 9, é ilustrada a tendência que a velocidade de alimentação do arame tem na altura do cordão.

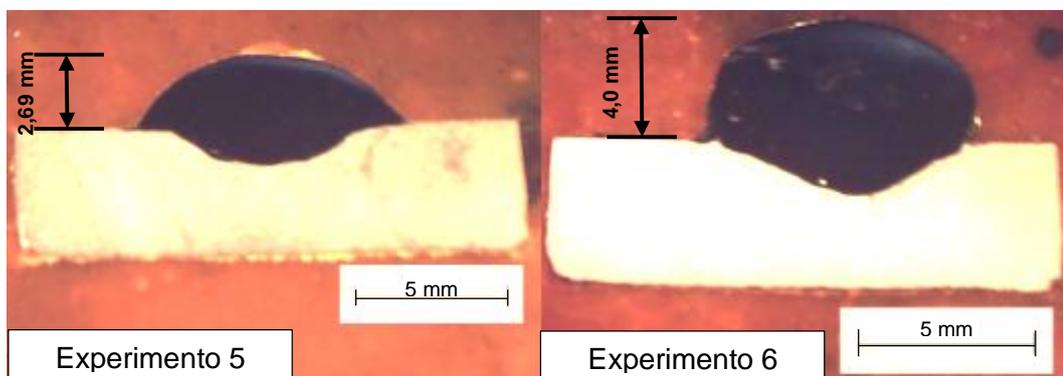


**Gráfico 9 - Influência da alimentação do arame na altura do cordão**

Fonte - Autoria própria

Observando o Gráfico 9, fica evidente que, ao aumentar a velocidade de alimentação do arame, existe um aumento da altura do cordão. Os valores obtidos nos experimento 1 e 2 foram muito próximos dos valores obtidos nos experimentos 3 e 4.

Na Figura 19, é feita uma comparação entre os experimentos 5 e 6, mostrando a diferença de altura do cordão, quando é variada a velocidade de alimentação do arame.



**Figura 19 - Comparação da altura dos cordões com a variação da velocidade de alimentação do arame**

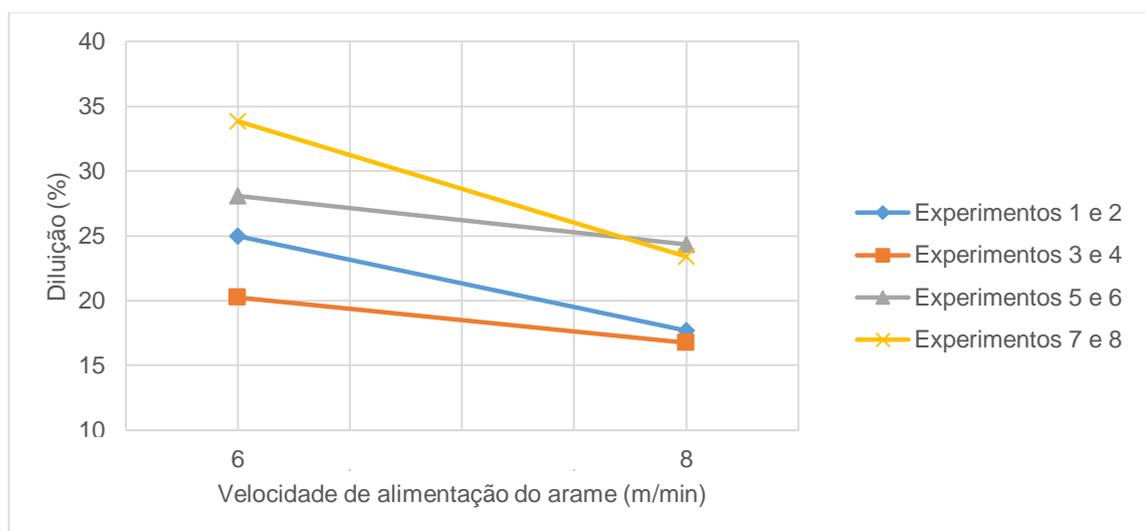
Fonte – Autoria própria

Na Figura 19, é possível observar que o aumento da velocidade de alimentação do arame aumenta significativamente a altura do cordão, sendo que no experimento 6 o cordão também apresenta um alto ângulo de molhabilidade, inadequado para este tipo de processo.

Estes resultados estão de acordo com as pesquisas feitas por Correa (2000) e Gomes (2010), que identificaram um aumento do reforço dos cordões com o aumento da velocidade de alimentação de arame.

#### 4.2.3 Influência da velocidade de alimentação do arame na diluição

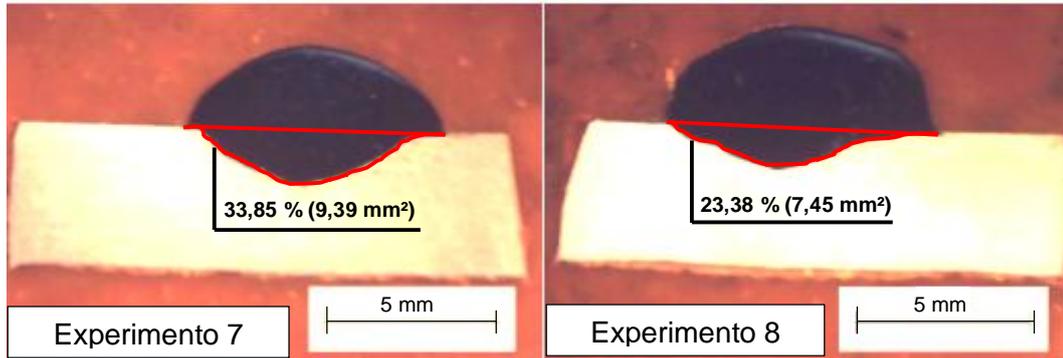
No Gráfico 10, é ilustrada a tendência que a velocidade de alimentação do arame tem na diluição.



**Gráfico 10 - Influência da velocidade de alimentação do arame na diluição**

**Fonte - Autoria própria**

Observando o Gráfico 10, é possível concluir que, quando existe um aumento da velocidade de alimentação do arame, existe uma diminuição da diluição. Na Figura 20, é ilustrada a comparação entre os experimentos 7 e 8.



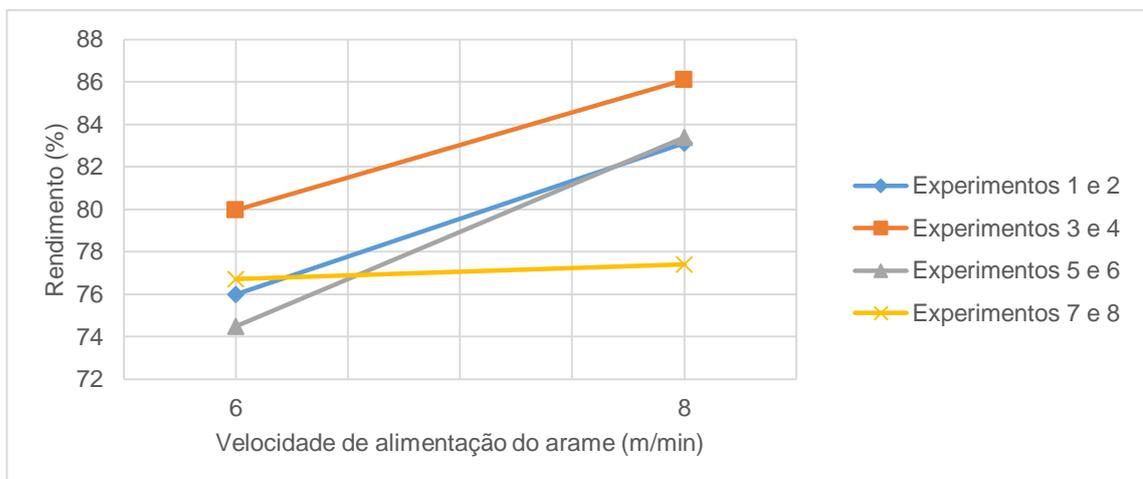
**Figura 20 - Comparação da diluição dos cordões com a variação da velocidade de alimentação do arame**

**Fonte - Autoria própria**

Analisando a Figura 20, é possível verificar a diminuição da diluição com o aumento da velocidade de alimentação do arame. Esta redução da diluição é benéfica para este tipo de processo, respeitando os limites pré-estabelecidos citados anteriormente.

#### 4.2.4 Influência da velocidade de alimentação do arame no rendimento

No Gráfico 11, é ilustrada a tendência que a velocidade de alimentação do arame tem no rendimento do processo.



**Gráfico 11 - Influência da velocidade de alimentação do arame no rendimento**

**Fonte - Autoria própria**

É possível observar no Gráfico 11, que com um acréscimo na velocidade de alimentação do arame, existe um aumento do rendimento do processo.

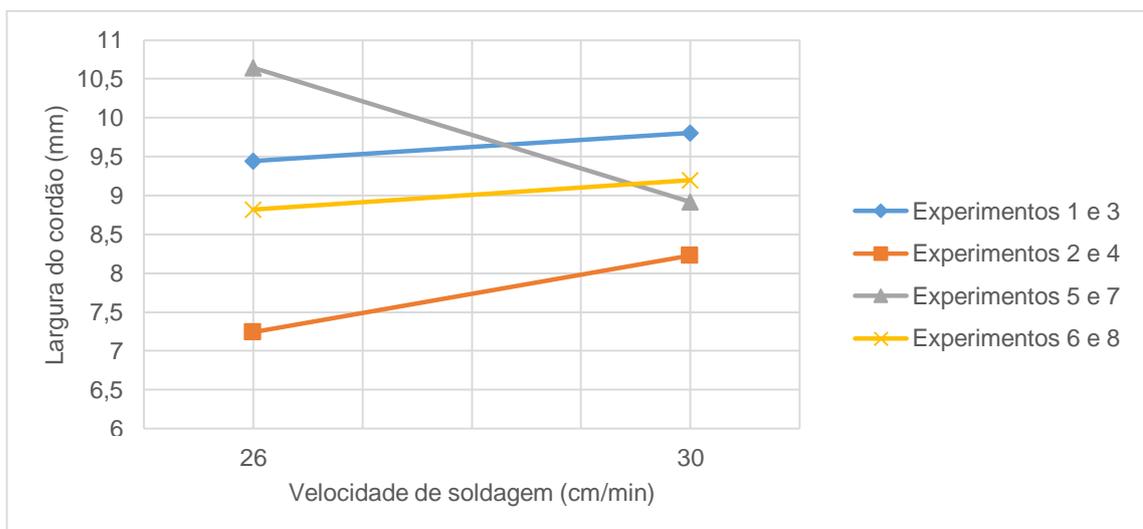
#### 4.3 ANÁLISE DA INFLUÊNCIA DA VELOCIDADE DE SOLDAGEM NO PROCESSO DE REVESTIMENTO

A velocidade de soldagem é definida como a relação entre o caminho percorrido pelo arco ao longo da peça e o tempo gasto para percorrê-lo.

A seguir serão descritas as influências que a velocidade de soldagem tem sobre a geometria, diluição e características econômicas dos experimentos realizados.

##### 4.3.1 Influência da velocidade de soldagem na largura do cordão

No Gráfico 12, é ilustrado qual é a influência da velocidade de soldagem na largura do cordão. É possível verificar que, com o aumento da velocidade de soldagem, existe uma tendência do aumento da largura do cordão, o que é benéfico para este processo.

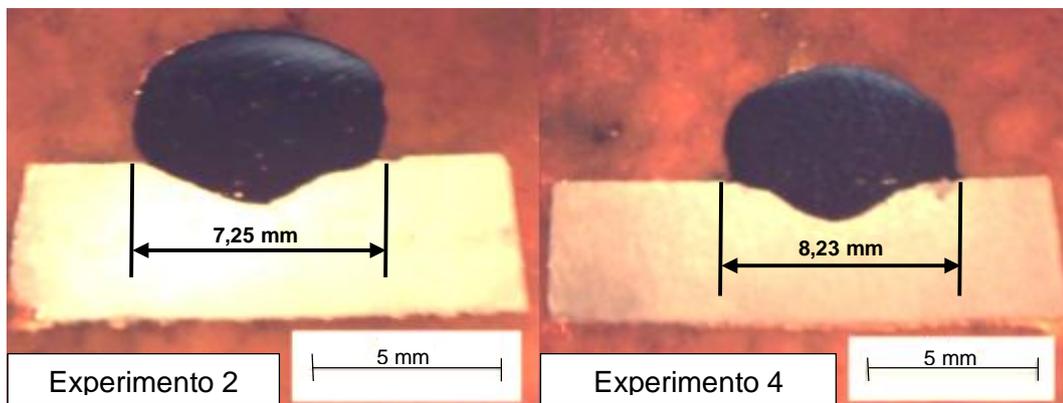


**Gráfico 12 - Influência da velocidade de soldagem na largura do cordão**

**Fonte – Autoria própria**

Estes resultados eram esperados de acordo com os autores citados na revisão bibliográfica. Em sua pesquisa, Brantis (1993) variou a velocidade de soldagem entre 17,6 cm/min e 27 cm/min, sendo que quando a velocidade foi de 17,6 cm/min os cordões gerados eram estreitos, chegando à conclusão que a melhor velocidade de soldagem era a de 25,3 cm/min, próxima a melhor velocidade encontrada nesta pesquisa, que foi de 26 cm/min.

A Figura 21, ilustra a comparação entre os experimento 2 e 4.



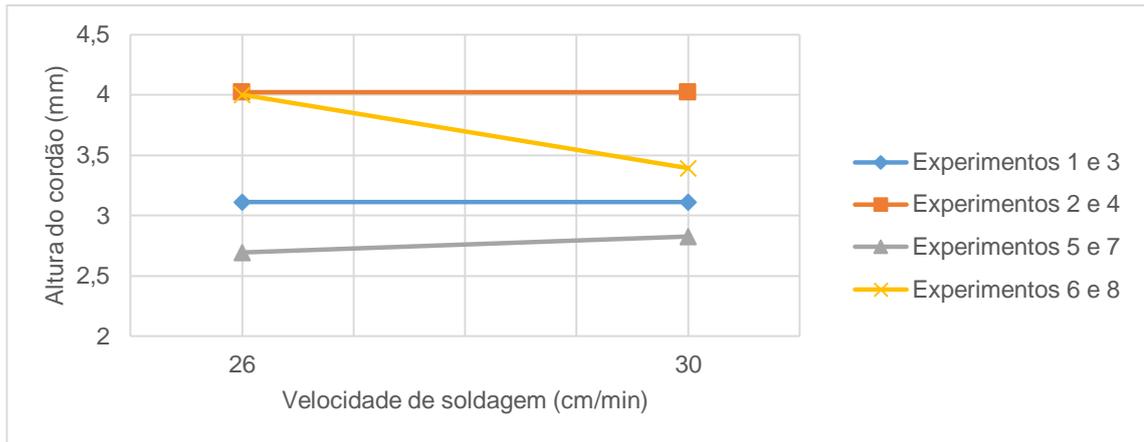
**Figura 21 - Comparação da largura dos cordões com a variação da velocidade de soldagem**

**Fonte - Autoria própria**

Observando o Gráfico 12, e analisando a Figura 21, é possível verificar que, existe uma tendência do aumento da largura do cordão com o aumento da velocidade de soldagem.

#### 4.3.2 Influência da velocidade de soldagem na altura do cordão

No Gráfico 13, é ilustrado qual é a influência da velocidade de soldagem na altura do cordão.

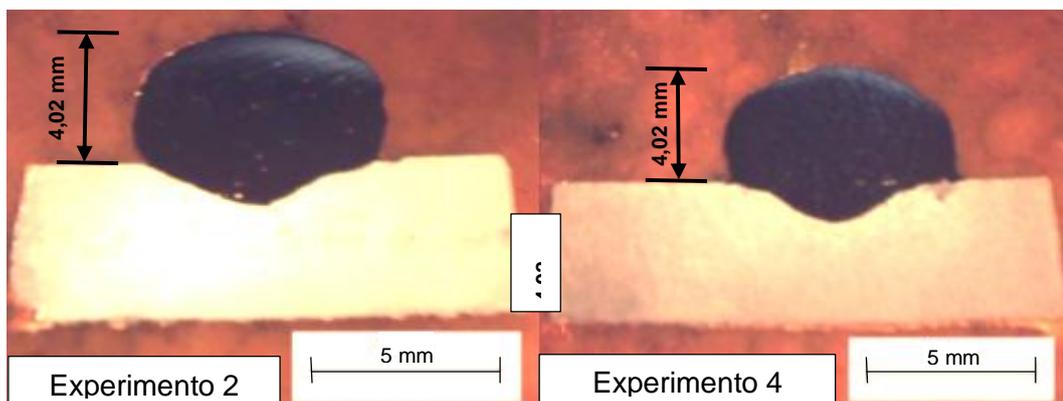


**Gráfico 13 - Influência da velocidade de soldagem na altura do cordão**

**Fonte - Autoria própria**

Observando o Gráfico 13, é possível verificar que com exceção dos experimentos 6 e 8, a variação de altura do cordão com o aumento da velocidade de soldagem é desprezível.

Na Figura 22, é possível verificar que a variação na altura do cordão é de fato desprezível.



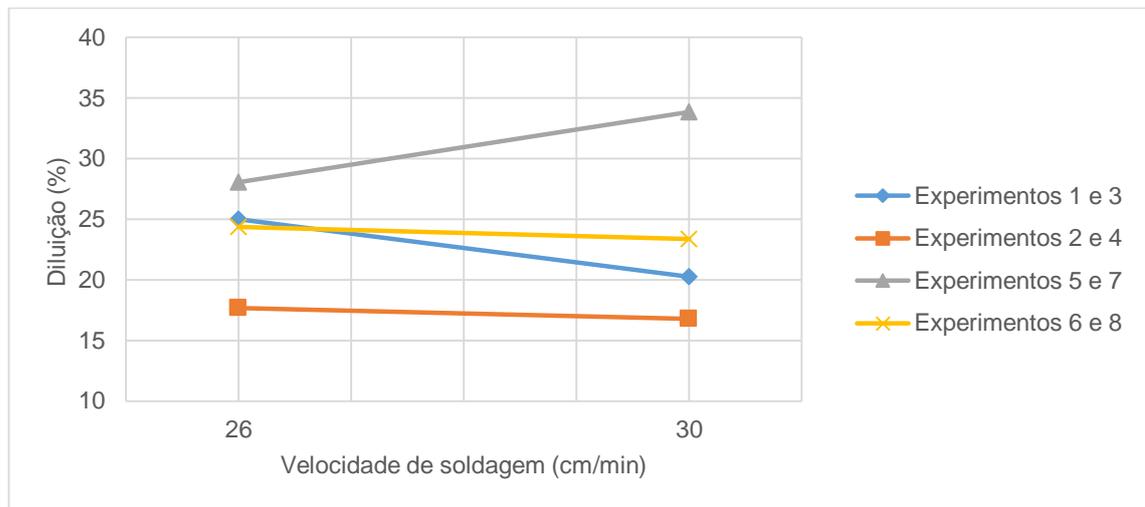
**Figura 22 - Comparação da altura dos cordões com a variação da velocidade de soldagem**

**Fonte - Autoria própria**

Pode-se concluir que a velocidade de soldagem não tem influência significativa na altura do cordão.

#### 4.3.3 Influência da velocidade de soldagem na diluição

No Gráfico 14, é ilustrado qual é a influência da velocidade de soldagem na diluição.

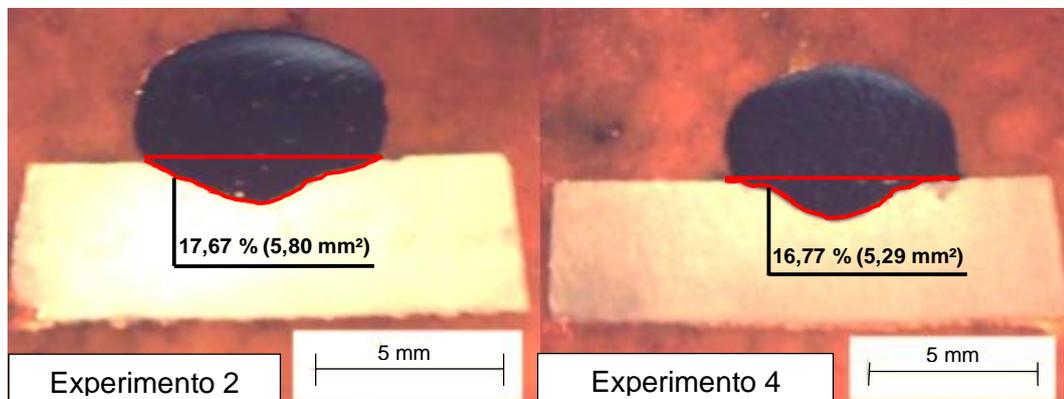


**Gráfico 14 - Influência da velocidade de soldagem na diluição**

Fonte - Autoria própria

Observando o Gráfico 14, verifica-se que na maioria dos experimentos, não existe variação na diluição com o aumento da velocidade de soldagem.

A Figura 23, mostra a comparação da diluição entre os experimentos 2 e 4.



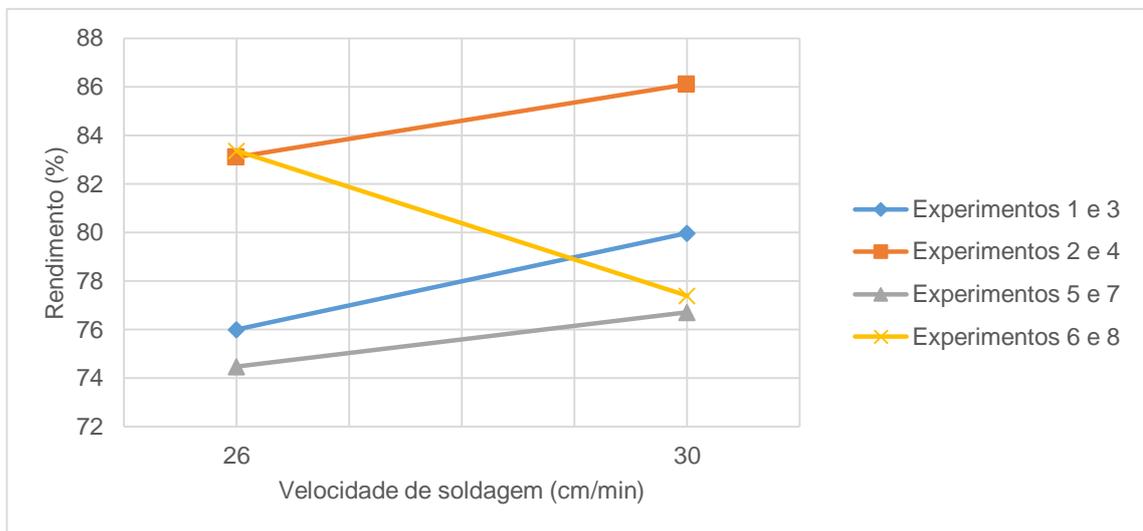
**Figura 23 - Comparação da diluição dos cordões com a variação da velocidade de soldagem**

Fonte - Autoria própria

Na Figura 23, pode ser verificado que a área de penetração é aproximadamente a mesma nos dois experimentos. Pode-se concluir que a velocidade de soldagem não tem forte influência na diluição dos cordões.

#### 4.3.4 Influência da velocidade de soldagem no rendimento

No Gráfico 15, é ilustrado qual é a influência da velocidade de soldagem no rendimento do processo.



**Gráfico 15 - Influência da velocidade de soldagem no rendimento**

**Fonte - Autoria própria**

No Gráfico 15, é possível observar que, com exceção dos experimentos 6 e 8, o aumento da velocidade de soldagem ocasiona um aumento no rendimento do processo de revestimento.

#### 4.4 CARACTERÍSTICAS DE DESEMPENHO DO PROCESSO DE REVESTIMENTO

Os parâmetros de soldagem deve garantir características do processo de revestimento satisfatórias e um alto rendimento. Fatores como o rendimento real

(Rend), a taxa de deposição (TD) e a taxa de fusão (TF), definem o desempenho econômico do processo de soldagem.

A seguir, serão analisados os resultados das características econômicas.

#### 4.4.1 Rendimento

O rendimento real é definido como a razão entre a massa do arame depositada ao metal base e a massa de arame consumida durante o processo de soldagem.

Na Tabela 7, são mostrados os valores de rendimento de cada experimento.

**Tabela 8 - Rendimento dos experimentos**

Experimento	Rendimento (%)
1	76,00
2	83,11
3	79,97
4	86,09
5	74,48
6	83,38
7	76,72
8	77,39

**Fonte – Autoria própria**

Analisando a Tabela 7, é possível verificar que o experimento 4 foi o que apresentou o melhor rendimento. O experimento 5 foi o que apresentou o menor rendimento. Nota-se que, os experimentos que utilizaram velocidade de alimentação de arame de 8 m/min, foram os que apresentaram os melhores rendimentos.

#### 4.4.2 Taxa de deposição

A taxa de deposição (TD) é definida pela massa de arame realmente adicionada ao metal de base por unidade de tempo.

Na Tabela 8, são mostrados os valores de taxa de deposição de cada experimento.

**Tabela 9 - Taxa de deposição dos experimentos**

Experimento	Taxa de deposição (Kg/h)
1	2,40
2	3,50
3	2,53
4	3,63
5	2,35
6	3,51
7	2,42
8	3,26

**Fonte – Autoria própria**

Analisando a Tabela 8, é possível constatar que os experimentos que utilizavam velocidade de alimentação de arame de 8 m/min, foram os que apresentaram maiores taxas de deposição, devido ao maior fornecimento de metal de adição por unidade de tempo.

#### 4.4.3 Taxa de fusão

A taxa de fusão é definida como a razão entre a massa de arame fundida e o tempo de soldagem.

Na Tabela 9, são mostrados os valores de taxa de fusão de cada experimento.

**Tabela 10 - Taxa de fusão dos experimentos**

Experimento	Taxa de fusão (Kg/h)
1	3,16
2	4,21
3	3,16
4	4,21
5	3,16
6	4,21
7	3,16
8	4,21

**Fonte – Autoria própria**

Analisando a Tabela 9, é possível verificar que os experimentos que utilizaram velocidade de alimentação de arame de 8 m/min, foram os que apresentaram melhor taxa de fusão.

#### 4.5 CARACTERÍSTICAS GEOMÉTRICAS

A seguir, serão analisadas as características geométricas de cada experimento realizado.

##### 4.5.1 Largura do cordão

Cada experimento teve a largura do cordão de solda medida. Os valores de largura de cada cordão são mostrados na Tabela 10.

**Tabela 11 - Largura do cordão dos experimentos**

Experimento	Largura (mm)
1	9,45
2	7,25
3	9,81
4	8,23
5	10,64
6	8,82
7	8,91
8	9,20

**Fonte – Autoria própria**

Analisando a Tabela 10, é possível verificar que o experimento 5 foi o que apresentou a maior largura de cordão. Quanto maior for a largura do cordão, mais área é coberta a cada passe de solda, logo, este experimento torna-se um dos mais adequados para a sequência da pesquisa.

#### 4.5.2 Altura do cordão

Todos os experimentos tiveram a altura do cordão de solda medida. Os valores são mostrados na Tabela 11.

**Tabela 12 - Altura do cordão dos experimentos**

Experimento	Altura (mm)
1	3,11
2	4,02
3	3,11
4	4,02
5	2,69
6	4,00
7	2,83
8	3,39

**Fonte – Autoria própria**

Analisando a Tabela 11, é verificado que o experimento 5 apresentou a menor altura de cordão. Esta característica é importante, pois em muitos casos, é necessário realizar processos posteriores ao revestimento, como a usinagem. Portanto, é desejável que seja retirado o mínimo possível de material em um processo posterior, logo, menores alturas de cordão são preferíveis.

#### 4.6 DILUIÇÃO

A diluição é definida como a relação entre a área fundida do metal de base e a área de reforço.

Os dados sobre diluição obtidos em todos os experimentos, são mostrados na Tabela 12.

**Tabela 13 - Diluição dos experimentos**

Experimento	Diluição (%)
1	24,99
2	17,67
3	20,27
4	16,77
5	28,07
6	24,34
7	33,85
8	23,38

**Fonte – Autoria própria**

Na Tabela 12, é possível verificar que o experimento 4 obteve a menor diluição, enquanto que o experimento 7 apresentou a maior diluição. Porém, em todos os experimentos, a diluição ficou entre os limites estabelecidos durante a revisão bibliográfica, que estão entre 15 % e 50%.

#### 4.7 ESCOLHA DA MELHOR COMBINAÇÃO DE PARÂMETROS

Diante dos dados apresentados anteriormente, foi definido como prioridade cobrir a maior área possível a cada passe do cordão de solda, bem como obter a menor altura de cordão. Também foi estabelecido que, a diluição deveria estar entre 15 e 50 %.

Com estes objetivos definidos, partiu-se para a escolha de qual experimento apresentou os melhores resultados, chegando-se a conclusão que o experimento 5 foi o mais adequado.

O experimento 5 apresentou a maior largura de cordão, sendo esta de 10,64 mm, bem como apresentou a menor altura de cordão, sendo esta de 2,69 mm. A diluição deste experimento foi de 28,07 %, ficando entre os limites pré-estabelecidos.

Também é possível verificar que este experimento utiliza menos metal de adição para cobrir uma área maior, se comparado ao demais experimentos, gerando uma economia no processo.

#### 4.8 ANÁLISE DA SOBREPOSIÇÃO DOS CORDÕES

Com a melhor combinação de parâmetros definida, foram executados novos experimentos, utilizando esta combinação de parâmetros. Os resultados são descritos a seguir.

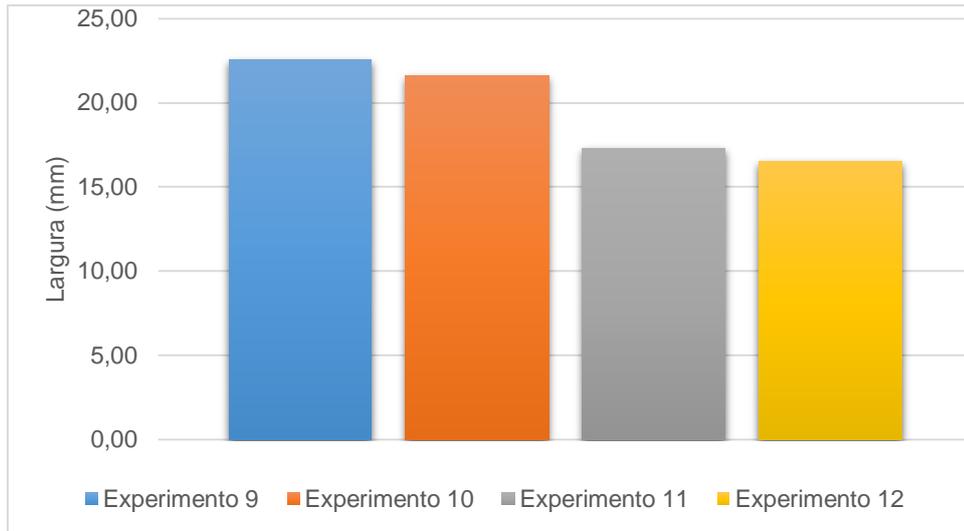
No processo de revestimento, deseja-se cobrir a maior área possível com o menor número de passes de cordões. Na Tabela 13, são mostrados os valores da largura máxima de cada experimento, lembrando que foram depositados 3 cordões paralelos.

**Tabela 14 - Largura dos experimentos**

Experimento	Sobreposição (%)	Largura (mm)
9	20	22,57
10	30	21,62
11	40	17,27
12	50	16,50

**Fonte – Autoria própria**

Na Tabela 13, pode ser verificado que com o aumento da sobreposição, existe uma redução na largura total revestida. No Gráfico 16, é mostrada a comparação entre as larguras obtidas com cada valor de sobreposição.

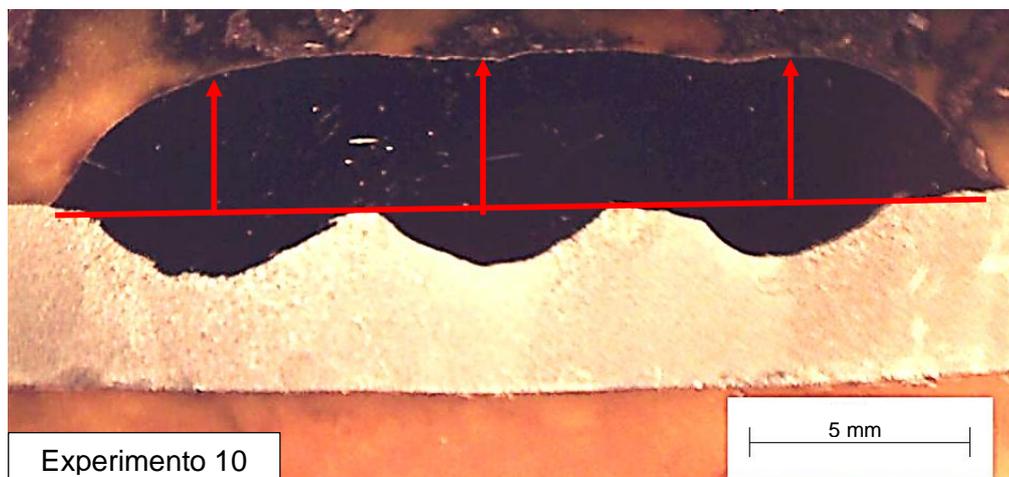


**Gráfico 16 - Comparação da largura dos experimentos**

Fonte - Autoria própria

Analisando a Tabela 13, e o Gráfico 16, pode ser concluído que, os experimentos 9 e 10 são os mais adequados, no que se refere a largura total revestida com o metal de adição.

Em cada experimento, foram feitas 3 medidas de altura, tomando como base o meio de cada cordão, a fim de determinar a média de altura, para que fosse possível de comparar com os demais experimentos. As medidas foram feitas como ilustra a Figura 24.



**Figura 24 - Medida das alturas para cálculo da média**

Fonte - Autoria própria

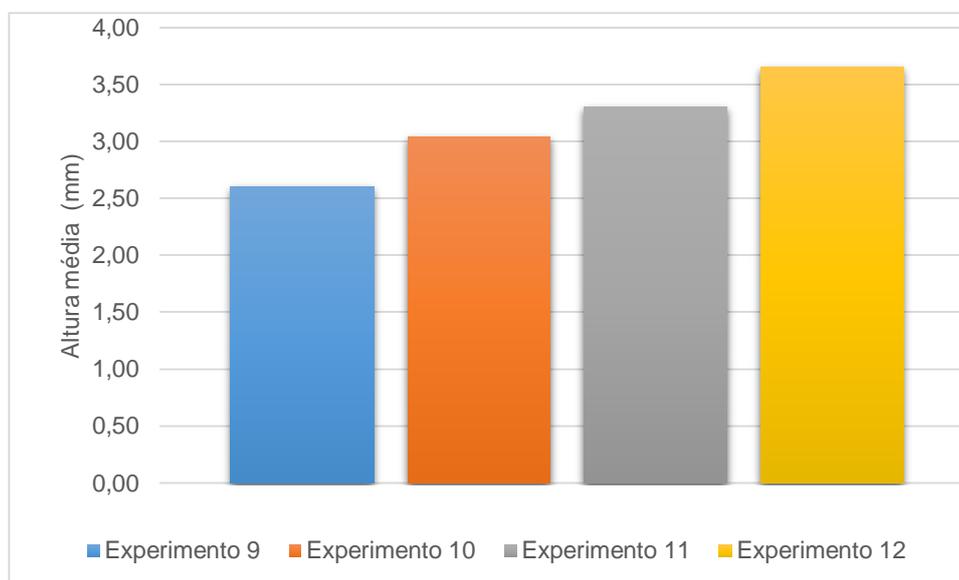
Para cálculo desta média de altura, são desconsideradas as laterais da amostra, supondo que em sua aplicação prática serão depositados  $n$  cordões paralelamente. Os valores de altura média são mostrados na Tabela 14.

**Tabela 15 - Altura média dos revestimentos**

Experimento	Sobreposição (%)	Altura média (mm)
9	20	2,61
10	30	3,04
11	40	3,30
12	50	3,65

Fonte – Autoria própria

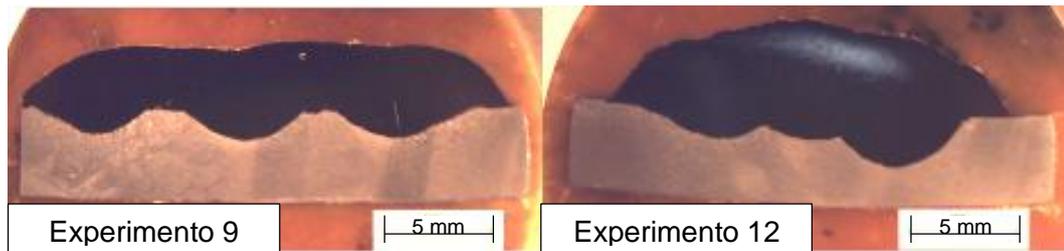
É possível verificar que, com o aumento da sobreposição, existe um aumento da altura dos cordões. Este crescimento é mostrado no Gráfico 17.



**Gráfico 17 - Comparação da altura média dos experimentos**

Fonte - Autoria própria

Analisando os dados sobre largura e altura do revestimento dos experimentos, pode ser verificado que, com o aumento da sobreposição, existe uma redução na largura do revestimento e um aumento na altura do cordão, como mostra a Figura 25, que compara um experimento com 20 % de sobreposição com um experimento de 50 % de sobreposição.

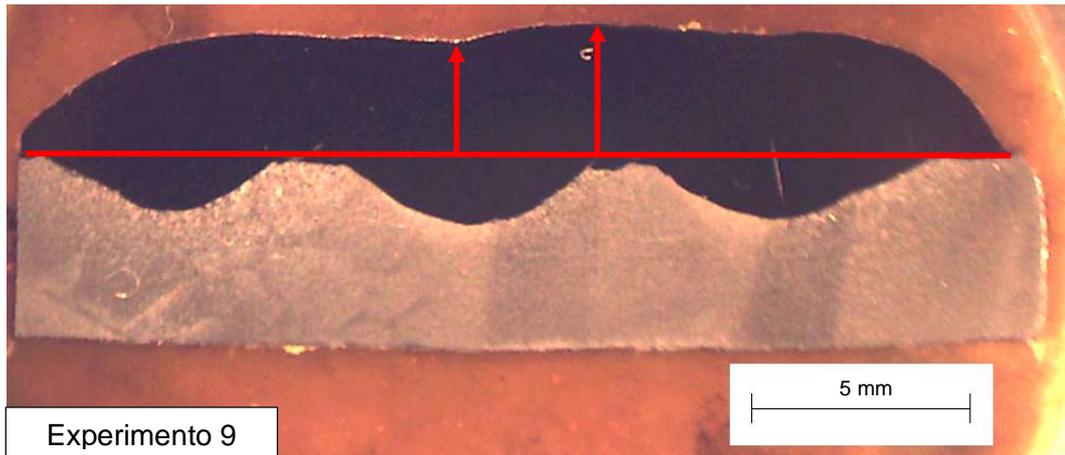


**Figura 25 - Comparação da altura dos experimentos 9 e 12**

**Fonte - Autoria própria**

Pode ser observado na Figura 25, que o experimento 12 apresenta um revestimento irregular, de forma arredondada. Este tipo de revestimento não é adequado, pois será necessário retirar mais material até atingir um acabamento plano. Já o experimento 9 apresenta um revestimento mais uniforme, sendo necessário retirar menos material para atingir um acabamento plano.

Na maioria dos casos, posterior ao processo de revestimento, é necessário realizar outros processos de fabricação, como a usinagem. Para tanto, foram realizadas medidas de altura no ponto mais baixo e no ponto mais alto dos experimentos, como ilustra a Figura 26. Após a realizar as medições, foi calculada a diferença de altura entre estes pontos, a fim de determinar quanto de material deveria ser removido durante o processo de usinagem.



**Figura 26 - Diferença de altura máxima**

**Fonte - Autoria própria**

Os valores com as diferenças máximas de altura são mostrados na Tabela 15.

**Tabela 16 - Diferença de altura máxima dos experimentos**

Experimento	Sobreposição (%)	Diferença máxima de altura (mm)
9	20	0,44
10	30	0,37
11	40	1,32
12	50	1,12

**Fonte – Autoria própria**

Analisando a Tabela 15, chega-se à conclusão que, o experimento 10 é o mais adequado levando-se em consideração processos de fabricação posteriores ao revestimento, pois será necessário retirar menos material para atingir um acabamento planejado.

Para verificar qual a diluição destes experimentos, novamente foram medidas as áreas de penetração e de reforço. Os valores de diluição de cada experimento são mostrados na Tabela 16.

**Tabela 17 - Diluição dos experimentos**

Experimento	Sobreposição (%)	Diluição (%)
9	20	26,17
10	30	24,85
11	40	20,23
12	50	30,04

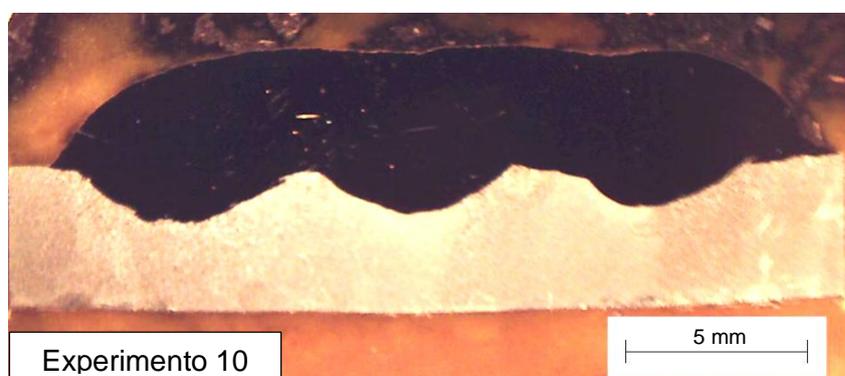
**Fonte – Autoria própria**

A diluição de todos os experimentos ficou entre os valores pré-estabelecidos de 15 % e 50 %.

Analisando os resultados de largura, altura, maior diferença de altura e diluição, pode-se concluir que, os experimentos 9 e 10 apresentam os melhores resultados para realizar o processo de revestimento eficientemente.

Nesta pesquisa, definiu-se que, seria necessário escolher a sobreposição que resultasse numa geometria que cobrisse a maior área, e apresentasse um perfil o mais plano possível, minimizando a retirada de material em processos de fabricação posteriores.

Desta forma, analisando os dados obtidos nos experimento, ficou definido que a sobreposição de 30 % foi a que apresentou os melhores resultados. Esta sobreposição resultou em um perfil próximo a de um plano, como mostra a Figura 27, bem como apresentou a menor diferença de altura, sendo necessário retirar o mínimo de material possível em processos posteriores.



**Figura 27 - Planicidade do experimento 10**

**Fonte - Autoria própria**

Este experimento também apresentou a segunda maior largura de revestimento, bem próxima da maior largura observada, bem como apresentou a segunda menor altura. Ambos aspectos são considerados benéficos ao processo de revestimento.

A diluição do experimento 10 foi a segunda menor, sendo que este aspecto também é de extrema importância.

## 5 CONCLUSÃO

Este trabalho apresentou uma análise da influência da tensão de soldagem, da velocidade de alimentação do arame e da velocidade de soldagem na morfologia dos cordões de solda, bem como a análise da sobreposição dos cordões de solda.

Foi possível observar que com o aumento da tensão de soldagem é observado um aumento da largura e diminuição da altura do cordão, gerando uma geometria mais adequada ao processo de revestimento. Também foi possível verificar que ao aumentar a tensão de soldagem, também existe um aumento na diluição, porém, para todos os experimentos, a diluição ficou entre os limites pré-estabelecidos no levantamento bibliográfico. Ao analisar a relação entre a tensão e o rendimento, foi possível verificar que com o aumento da tensão, existe uma queda no rendimento do processo.

Analisando a influência da velocidade de alimentação do arame na largura e na altura do cordão de solda, foi possível verificar que, com o aumento da velocidade de alimentação do arame, existe uma diminuição da largura do cordão e aumento da altura, características que não são desejáveis no processo de revestimento. Foi demonstrado que ao aumentar a velocidade de alimentação do arame, existe uma redução na diluição e aumento do rendimento do processo.

Também foi analisada a influência da velocidade de soldagem na largura e na altura do cordão de solda, sendo que, quando a velocidade de soldagem foi aumentada, ocorreu um aumento na largura do cordão de solda, e a altura mostrou uma tendência de manter seu valor. Na maioria dos experimentos, foi verificado que a velocidade de soldagem não influencia na diluição. Em relação ao rendimento, quando a velocidade de soldagem aumenta, existe uma tendência de aumentar o rendimento do processo.

Foi possível determinar qual a melhor sobreposição dos cordões de solda, reduzindo a quantidade de material que poderá ser retirado em processos posteriores.

Combinando os melhores resultados, chega-se à conclusão que, ao utilizar tensão de 27 V, velocidade de alimentação do arame de 6 m/min, velocidade de soldagem de 26 cm/min e sobreposição de 30 %, foi possível obter os melhores resultados, ou seja, a combinação dos parâmetros utilizados no experimento 5 com a

sobreposição utilizada no experimento 10. Esta combinação de parâmetros permite aplicar revestimentos utilizando o processo *MIG* com eficiência.

Após realizar o estudo de viabilidade e comprovada sua qualidade, o processo de revestimento por deposição de aço inoxidável em substrato de carbono torna-se uma alternativa atrativa, mostrando bons resultados aliados a um baixo custo.

## REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

AMERICAN SOCIETY OF MECHANICAL ENGINEERS. **Qualificação para Soldagem e Brasagem, Seção IX.** Rio de Janeiro: Instituto Brasileiro de Petróleo, 1983.

BRANTIS, Fernando César Aguiar. **Efeito dos Parâmetros do Processo de Soldagem na Propriedades do Revestimento.** Campinas, 1993.

CIAFAL. **Composição Química dos Aços.** Disponível em <[http://www.ciafal.com.br/download/TB-012\\_Composicao\\_quimica\\_dos\\_acos.pdf](http://www.ciafal.com.br/download/TB-012_Composicao_quimica_dos_acos.pdf)>. Acesso em 05/06/13.

CORRÊA, Celso Alves. **Aço inoxidável martensítico aplicado em revestimento pelo processo MIG pulsado e convencional.** Campinas, SP: [s.n.], 2000.

FOGAGNOLO, João Batista. **Introdução a Processos e Metalurgia da Soldagem.** Campinas, 2011. Disponível em <<ftp://ftp.fem.unicamp.br/pub/Fogagnolo/apostila%20de%20soldagem.pdf>>. Acesso em 13 set. 2012.

FORTES, Cleber. **Soldagem MIG/MAG.** ESAB. 2005. Disponível em <[http://www.esab.com.br/br/por/instrucao/biblioteca/upload/1901104rev0\\_apostilasoldagemmigmag.pdf](http://www.esab.com.br/br/por/instrucao/biblioteca/upload/1901104rev0_apostilasoldagemmigmag.pdf)>. Acesso em 26 set. 2012.

GIMENES JUNIOR, Luiz et al. **Processo MIG/MAG – Parâmetros de Soldagem.** Osasco 2012. Disponível em <<http://www.infosolda.com.br/biblioteca-digital/livros-senai/processos/174-processo-mig-mag-parametros-desoldagem.html>>. Acesso em 04/08/13.

GOMES, José Henrique de Freitas Gomes. **Análise e otimização da soldagem de revestimento de chapas de aço ABNT 1020 com utilização de arame tubular inoxidável austenítico**. Itajubá, 2010.

MODENESI, Paulo J. **Terminologia Usual de Soldagem e Símbolos de Soldagem**. Belo Horizonte, 2008. Disponível em < <http://demet.eng.ufmg.br/wp-content/uploads/2012/10/terminologia.pdf> >. Acesso em 13 set. 2012.

MURUGAN, N; PARMAR, R. S. **Stainless steel cladding deposited by automatic gas metal arc welding**. *Welding Journal*, v. 76, 1997.

NICROSOL. **Composição Química dos Arames de Solda**. Disponível em <[http://nicrosol.com.br/produtos\\_detalhes.asp?codcategoria=7](http://nicrosol.com.br/produtos_detalhes.asp?codcategoria=7)>. Acesso em 05/06/13.

SAMRA FILHO, Omar Abou. **Soldagem de revestimento em componentes subsea utilizando soldagem TIG-HOTWIRE e arame sólido ER NiCrMo-3**. Böhler Welding Group, ed 23, ano III, 2012.

SILVA JUNIOR, Luiz Paulo da et al. **Influência da Variação do Tecimento, Ângulo do Ataque e Velocidade de Alimentação sobre a Geometria de Cordões de Revestimento pelo Processo MIG-DWOA**. Caxias do Sul, 2011.

SILVA, Fabio Gonçalves da; BRAGA, Eduardo de Magalhães; FERRARESI Valtair Antônio. **Adequação Do Processo De Soldagem Mig/Mag Com Adição De Arame Frio Na Qualidade Do Revestimento Com Aço Inoxidável Austenítico Sobre Um Aço Ao Carbono Comercial**. Uberlândia, 2011.

SILVA, Régis Henrique Gonçalves. **Desenvolvimento da soldagem MIG/MAG em transferência metálica por curto-circuito com controle de corrente para**

**aplicação em passes de raiz.** Florianópolis, 2005. Disponível em <[http://www.labsolda.ufsc.br/projetos/projetos\\_concluidos/mig\\_mag\\_cc.php](http://www.labsolda.ufsc.br/projetos/projetos_concluidos/mig_mag_cc.php)>. Acesso em 12 set. 2012.

WAINER, E. **Soldagem:** Processos e Metalurgia. São Paulo: E. Edgard Blücher, 1992.

WAINER, Emílio; BRANDI, Sérgio Duarte; MELLO, Fábio Décourt Homem de. **Soldagem:** processos e metalurgia. São Paulo: E. Blücher, 1992. 494 p.