

UNIVERSIDADE TECNOLÓGICA FEDERAL DO PARANÁ
DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA MECÂNICA
ENGENHARIA MECÂNICA

GUSTAVO MEDEIROS SOUZA DO NASCIMENTO

**ANÁLISE DO PROCESSO DE DEPOSIÇÃO FCAW DE UMA LIGA DE
CARBONETO DE CROMO APLICANDO O PLANEJAMENTO
EXPERIMENTAL CENTRAL COMPOSITE CIRCUMSCRIBED**

TRABALHO DE CONCLUSÃO DE CURSO

PONTA GROSSA
2020

GUSTAVO MEDEIROS SOUZA DO NASCIMENTO

**ANÁLISE DO PROCESSO DE DEPOSIÇÃO FCAW DE UMA LIGA DE
CROMO APLICANDO O PLANEJAMENTO EXPERIMENTAL
CENTRAL COMPOSITE CIRCUMSCRIBED**

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

Orientador: Prof. Dr. Anderson Geraldo Marena Pukasiewicz

Coorientador: Prof. Dr. Luciano Augusto Lourençato

PONTA GROSSA

2020



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



TERMO DE APROVAÇÃO

**ANÁLISE DO PROCESSO DE DEPOSIÇÃO FCAW DE UMA LIGA DE
CARBONETO DE CROMO APLICANDO O PLANEJAMENTO EXPERIMENTAL
CENTRAL COMPOSITE CIRCUMSCRIBED**

por

GUSTAVO MEDEIROS SOUZA DO NASCIMENTO

Este Trabalho de Conclusão de Curso foi apresentado em 19 de março de 2020 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
Coorientador

Prof. Dr. Roger Navarro Verastegui
Membro Titular

Prof. Dr. Hipólito Domingo Carvajal Fals
Membro Titular

Prof. Dr. Marcos Eduardo Soares

Responsável pelos TCC

Prof. Dr. Marcelo Vasconcelos de
Carvalho

Coordenador do Curso

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

Dedico este trabalho à Deus, minha
família, minha esposa e amigos, pelos
momentos de ausência.

AGRADECIMENTOS

Agradeço primeiramente à Deus, por me guiar durante toda a minha vida, me abençoando e dando o alimento espiritual necessário para superar os momentos difíceis.

Aos meus pais, Samuel e Neiva, agradeço por me ensinarem o valor da fé, perseverança e honestidade e ser uma pessoa digna. Aos meus irmãos, Lucas e Gabriela, por toda paciência e pela oportunidade de melhorar como ser humano. A minha mulher, Amanda, agradeço pelo apoio moral e compreensão pela minha ausência.

Aos meus avós pelos conselhos e ensinamentos, ao meu avô Dito pelos ensinamentos passados a mim na mais tenra idade que formaram o homem e profissional que eu sou, do qual tenho muita saudade levarei pra sempre em minha memória.

Ao meu orientador, Dr. Anderson Geraldo Marena Pukasiewicz pela confiança e pelo suporte nos trabalhos que desenvolvemos, pelo exemplo de professor e pesquisador.

Ao meu coorientador, Dr. Luciano Augusto Loureçato, prestatividade e pelo suporte dispensando a mim.

Agradeço meus amigos, por caminharmos juntos do início ao fim do curso, pelo apoio durante os momentos difíceis que tornaram nossa caminhada muito mais feliz e alegre.

Combati o bom combate, terminei a
corrida, guardei a fé.
2 Timóteo 4:7

RESUMO

NASCIMENTO, Gustavo. **Análise do processo de deposição FCAW de uma liga de carboneto de cromo aplicando o planejamento experimental *Central Composite Circumscribed***.2020. 77 f. Trabalho de Conclusão de Curso Bacharelado em Engenharia Mecânica - Universidade Tecnológica Federal do Paraná. Ponta Grossa, 2020.

A otimização dos sistemas produtivos e a redução de custos passa pela melhoria das propriedades mecânicas dos materiais como a resistência e a dureza. Assim sendo, tem-se por objetivo desse estudo observar o comportamento de revestimento depositados de uma liga de carbono de cromo, com a variação de três parâmetros de soldagem como tensão elétrica, velocidade de deslocamento e velocidade de alimentação de arame em três níveis. Objetivando a análise da influência da geometria do cordão de solda, microestrutura e dureza, e determinar a combinação dos parâmetros mais favoráveis para a deposição do revestimento de carboneto de cromo usando o processo Flux Cored Arc Welding (FCAW).O sistema utilizado para o processo de soldagem é constituído da utilização de arame tubular de carboneto de cromo do tipo “metal cored” e gás de proteção Ar-25%CO₂.Para viabilizar o procedimento experimental, com a variação dos parâmetros do processo de deposição, foi utilizado o planejamento experimental Central Circumscribed Composite(CCC).Os resultados gerados como microdureza e geometria do cordão de solda foram analisados com auxílio do software Minitab®.Os aspectos analisados da geometria do cordão, como: largura, penetração, reforço, diluição e relação reforço/largura, para a aplicação do revestimento e sua singularidade. A diluição apresentou resultados percentuais baixos e na relação reforço/largura apresentou também resultados satisfatórios para que a deposição reúna as características de um revestimento com qualidade. Os revestimentos de carboneto de cromo possuem elevados níveis de dureza, o que foi corroborado pelos resultados obtidos nos ensaios de verificação realizados neste estudo.

Palavras-chave: FCAW; CCC; Carboneto de Cromo.

ABSTRACT

NASCIMENTO, Gustavo. **Analysis of the chromium carbide alloy FCAW deposition process applying the experimental design Central Composite Circumscribed**. 2020. 77 p. Work of Conclusion Course Graduation Mechanical Engineering - Federal Technology University - Paraná. Ponta Grossa, 2020.

The optimization of production systems and cost reduction involves the improvement of the mechanical properties of materials such as strength and hardness. Therefore, the objective of this study is to observe the coating behavior deposited from a chromium carbon alloy, with the variation of three welding parameters such as arc tension, welding speed and feed speed at three levels. Aiming to analyze the influence of weld bead geometry, microstructure and hardness, and determine the combination of the most favorable parameters for the deposition of the chromium carbide coating using the Flux Cored Arc Welding (FCAW) process. The system used for the welding process consists of the use of tubular wire of chromium carbide of the type "metal cored" and shielding gas Ar-25% CO₂. For make the experimental procedure feasible, with the variation of the parameters of the deposition process, experimental design Central Circumscribed Composite (CCC). The results generated as microhardness and weld bead geometry were analyzed with the aid of the Minitab® software. The analyzed aspects of bead geometry, such as: width, penetration, reinforcement, dilution and reinforcement / width ratio, for the application of the coating and its uniqueness. The dilution showed low percentage results and, in the reinforcement, / width ratio it also showed satisfactory results so that the deposition meets the characteristics of a quality coating. Chromium carbide coatings have high levels of hardness, which was corroborated by the results obtained in the verification tests carried out in this study.

Keywords: FCAW; CCC; Chromium carbide.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 - Abrasão a dois corpos	18
Figura 2 - Processo de usinagem.....	18
Figura 3 - Abrasão à três corpos	19
Figura 4 - Processo de polimento.....	19
Figura 5 - Abrasão em uma peça.....	20
Figura 6 - Soldagem MIG/MAG	21
Figura 7 - Relação corrente e tensão para transferência globular.....	22
Figura 8 - Relação corrente e tensão para a transferência curto circuito	24
Figura 9 - Comparação entre volume e número de gotas	24
Figura 10 - Relação corrente e tensão para transferência por pulverização	26
Figura 11 - Relação corrente e tensão para transferência por arco pulsado.....	27
Figura 12 - Soldagem MIG/MAG semiautomática	27
Figura 13 - Braço robótico para processo MIG/MAG	28
Figura 14 - Equipamentos de soldagem MIG/MAG	29
Figura 15 - Equipamentos de soldagem MIG/MAG automático	30
Figura 16 - Tocha MIG/MAG	30
Figura 17 - Fonte de energia.....	31
Figura 18 - Alimentador de arame.....	32
Figura 19 - Suprimento de gás.....	33
Figura 20 - Válvula de vazão de gás	33
Figura 21 - Sistema de deslocamento.....	34
Figura 22 - Soldagem com arame tubular	37
Figura 23 - Classificação AWS.....	38
Figura 24 - Geometria do cordão de solda	39
Figura 25 - Dureza x teor de carbono.....	40
Figura 26 - Relação dureza do abrasivo e do metal x velocidade de desgaste	41
Figura 27 - Modelo de processo.....	42
Figura 28 - Procedimento de um planejamento experimental	43
Figura 29 - Representação gráfica do RMS	46
Figura 30 - Superfície de contorno	46
Figura 31 - Gráfico de contorno.....	46
Figura 32 - Disposição dos fatores.....	47
Figura 33 - Center points e star points	48
Figura 34 - Planejamento rotacional.....	48
Figura 35 - Planejamentos rotacionáveis	48
Figura 36 - Central Composite Inscribed.....	49
Figura 37 - Central Composite Faced	49

Figura 38 - Central Composite Circumscribed.....	49
Figura 39 - Central Composite Circumscribed.....	50
Figura 40 - Dimensões do corpo de prova.	54
Figura 41 - Especificações Técnicas Conjunto Semiautomático MIG/MAG Smashweld 315.....	54
Figura 42 - Especificações técnicas alimentador de arame MEF30.....	55
Figura 43 - Sistema de deslocamento.....	55
Figura 44 - Sistema instalado para o estudo.....	56
Figura 45 - Corpo de prova submetido ao ensaio de Líquidos Penetantes.....	57
Figura 46 - Medição do cordão de solda (corpo de prova 14).....	59
Figura 47 - Área abaixo da linha do metal base.....	60
Figura 48 - Área acima da linha do metal base.....	60
Figura 49 – Tensão por velocidade de soldagem para diluição.....	64
Figura 50 – Velocidade de soldagem por velocidade de alimentação para diluição.....	65
Figura 51 - Tensão por velocidade de soldagem para largura.....	66
Figura 52 – Tensão por velocidade de arame para largura.....	67
Figura 53 – Velocidade de soldagem por tensão para reforço.....	68
Figura 54 - Velocidade de soldagem por velocidade de alimentação para reforço.....	69
Figura 55 - Superfície de resposta e gráfico de contorno para Microdureza Vickers (30 cm/min).....	70
Figura 56 - Superfície de resposta e gráfico de contorno para Microdureza Vickers (3 m/min).....	71
Figura 57 - (a) micrografia amostra 5; micrografia amostra 14.....	72
Figura 58 - Micrografia zona intermediária do cordão de solda.....	73
Figura 59 - Micrografia zona de topo do cordão de solda.....	73
Figura 60 - (a) micrografia amostra 1; micrografia amostra 6.....	74
Figura 61 - (a) micrografia amostra 16; (b) micrografia amostra 17.....	74
Figura 62 - Formação de carbonetos na região central da amostra 16 (a) visão geral, (b) detalhe da formação do carboneto poligonal.....	77

LISTA DE FIGURAS

Gráfico 1 - Microdureza Vickers x distância	63
Gráfico 2 - Composição química dos cordões de solda.	76

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 - Parâmetros e níveis	51
Tabela 2 - Corridas experimentais codificadas.....	52
Tabela 3 - Corridas experimentais decodificadas.....	53
Tabela 4 - Composição do aço 1020.....	54
Tabela 5 - Composição química Arame tubular	55
Tabela 6 - Composição reativo Villela	57
Tabela 7 - Medidas geometria do cordão de solda	61
Tabela 8 - Microdureza Vickers.....	62

LISTA DE SIGLAS

AWS	<i>American Welding Society</i>
MIG	<i>Metal Inert Gas</i>
NBR	Norma Brasileira Regulamentadora
GMAW	<i>Gas Metal Arc Welding</i>
FCW	<i>Flux-Cored Wires</i>
FCAW	<i>Flux-Cored Arc Welding</i>
MRS	<i>Method Response Surface</i>
PCC	Planejamento Composto Central
DCC	<i>Design Central Composite</i>
CCD	<i>Central Composite Design</i>
CCI	<i>Central Composite Inscribed</i>
CCF	<i>Central Composite Faced</i>
CCC	<i>Central Composite Circumscribed</i>
DOE	<i>Design of Experiments</i>
LP	Líquidos Penetrantes
MEV	Microscópio Eletrônico de Varredura
ASTM	<i>International Standards Worldwide</i>
IC	Índice de Convexidade

SUMÁRIO

1 INTRODUÇÃO	13
2 REFERENCIAL TEÓRICO	16
2.1 A PRODUTIVIDADE E A MANUTENÇÃO	16
2.2 DESGASTE SUPERFICIAL	17
2.3 ABRASÃO.....	17
2.4 SOLDAGEM MIG/MAG.....	20
2.4.1 Modos de transferência metálica	21
2.4.1.1 Transferência Globular.....	22
2.4.1.2 Transferência por curto-circuito.....	23
2.4.1.3 Transferência por pulverização.....	24
2.4.1.4 Transferência por arco pulsado.....	26
2.4.1.5 Vantagens do processo MIG/MAG.....	27
2.4.1.6 Desvantagens do processo MIG/MAG.....	28
2.5 EQUIPAMENTO DE SOLDAGEM	29
2.5.1 Tocha	30
2.5.2 Fonte de energia.....	31
2.5.3 Alimentador de arame.....	32
2.5.4 Cilindro de gás de proteção	33
2.5.5 Sistema de deslocamento.....	34
2.6 PARÂMETROS DE SOLDAGEM.....	34
2.6.1 Tensão do arco	34
2.6.2 Velocidade de deslocamento	35
2.6.3 Velocidade de alimentação de arame.....	36
2.7 SOLDAGEM COM ARAME TUBULAR	36
2.8 GEOMETRIA DO CORDÃO DE SOLDA	38
2.9 ESTRUTURA METALÚRGICA DO REVESTIMENTO	39
2.9.1 Revestimento duro.....	40
2.10 PLANEJAMENTO EXPERIMENTAL	42
2.10.1 Método da superfície de resposta.....	44
2.10.2 Central circumscribed composite.....	47
3 METODOLOGIA.....	51
3.1 PLANEJAMENTO EXPERIMENTAL.....	51
3.2 PREPARAÇÃO DAS AMOSTRAS.....	53
3.3 PREPARAÇÃO DOS CORPOS DE PROVA	56
3.3.1 Ensaio de líquidos penetrantes.....	56
3.3.2 Preparação de amostras para análise metalográficas	57
3.3.3 Análise de microscopia ótica	58
3.3.4 Análise de microscopia eletrônica de varredura	58

3.3.5 Ensaio de microdureza Vickers.....	58
4 RESULTADO E DISCUSSÕES.....	59
4.1.1 Análise de microdureza Vickers.....	61
4.1.2 Análise da superfície de resposta.....	63
4.1.2.1 Diluição	63
4.1.2.2 Largura.....	65
4.1.2.3 Reforço	67
4.1.2.4 Microdureza Vickers.....	69
4.1.3 Análise da microestrutura	72
4.1.4 Análise da composição química.....	75
5 CONCLUSÃO.....	78
REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS.....	79

1 INTRODUÇÃO

A perda de material das peças devido as condições ambientais e uso, representam custos de substituição e reparo elevados. A manutenção corretiva advinda da quebra, perda de eficiência, aumento da vibração e do aumento dos ruídos do elemento acarreta na interrupção da produção, custos de manutenção e depreciação dos ativos (LEITE; MARQUES,2009).

Um dos mecanismos de desgaste das peças aplicadas em máquinas produtivas, a abrasão, promove problema no material.

O desgaste é o fenômeno superficial que consiste na deterioração mecânica gradual da superfície metálica em contato, mediante o arrancamento de partículas (FERRARESI,1986).

A abrasão por sua vez é definida por Wainer, Brandi e De Melo (1992) como o desgaste devido a partículas e/ou protuberâncias duras que são forçadas contra uma superfície e se movem sobre ela.

Os elementos de máquinas mais empregados nesse tipo de atividade, que incluem operação em meio a atrito elevado, são, por exemplo, as facas picadoras empregadas nas cortadeiras de cana-de-açúcar. Elas possuem alto custo de substituição, e por este motivo a alternativa mais viável é a sua recuperação realizada por meio da deposição de material, repondo o material perdido pela abrasão, através do processo de soldagem (LIMA; FERRARESI,2009).

Os materiais utilizados para a fabricação das facas picadoras em sua maioria são de aço 1020 e são revestidos com metal duro somente nas partes que entram em contato com a matéria prima, que são resistentes a abrasão e possuem elevadas propriedades mecânicas para suportar as solicitações provenientes da sua operação (LIMA; FERRARESI,2009).

A recuperação das peças se dá por meio da deposição de material utilizando processos de soldagem, porém há uma gama muito grande de técnicas e materiais que podem ser utilizados.

Um desses processos, o arame tubular, que reúne as principais qualidades do MIG/MAG como elevadas taxas de deposição, fator de trabalho do soldador e rendimento, culminando na alta qualidade de solda e alta produtividade. Além de agregar aspectos positivos do processo de soldagem com eletrodo revestido como

ajuste da composição química do cordão de solda, da facilidade de execução em campo e alta versatilidade (LEITE; MARQUES,2009).

Para aumentar a vida útil do componente, bem como reduzir os fatores que contribuem para que os mesmos apresentem maiores taxas de abrasão prejudicando a sua operação, se faz necessário aprofundar o conhecimento nos parâmetros utilizados no processo de soldagem e na influência deles sobre o material.

A aplicação dos parâmetros que proporcionam a recuperação adequada desses componentes, pode aumentar a capacidade de utilização e vida útil, reduzir o tempo para recondicionamento dessas peças e diminuir os gastos financeiros associado ao tempo fora de operação.

Para alcançar os resultados satisfatórios que dizem respeito a vida útil do componente e redução dos custos, as propriedades do material e os fatores que o influenciam diretamente devem ser esmiuçados para utilizar as melhores configurações para realização da manutenção.

A determinação das propriedades do material e do seu revestimento e a característica microestrutural que implicam no aumento da sua resistência são de fundamental importância para aumentar o seu desempenho nas condições em que operam, uma vez que existe uma variedade muito grande de ligas, metais de adição e processos de soldagem que podem ser empregadas alterando as propriedades do produto.

A contribuição desse trabalho é no sentido de conhecer o impacto nas características microestruturais e nas propriedades mecânicas que a alteração dos parâmetros do processo de soldagem pode proporcionar ao material a ser recuperado.

O objetivo desse trabalho é verificar os impactos que a alteração dos parâmetros de processo de soldagem, relacionados a recuperação das peças, influenciam nas características e propriedades mecânicas e metalúrgicas do material estudado.

Por meio da microscopia ótica observar a geometria do cordão e por meio da microscopia eletrônica de varredura, avaliar a composição química do revestimento e observar a formação de carboneto de cromo. Realizar ensaios de microdureza Vickers para determinar a dureza do revestimento. E com o auxílio do software Minitab, estabelecer os gráficos de contorno para representação dos resultados obtidos.

Com isso busca-se observar a microestrutura resultante, obtendo configurações de parâmetros mais favoráveis para as propriedades mecânicas estudadas e determinar a dureza do revestimento.

2 REFERENCIAL TEÓRICO

2.1 A PRODUTIVIDADE E A MANUTENÇÃO

Dentre os muitos fatores que podem influenciar a produtividade de uma unidade fabril, sendo comum a todos os setores industriais, é a disponibilidade operacional da planta de processo.

Segundo a NBR 5462 a disponibilidade é a capacidade de um item estar em condições de executar uma certa função em um dado instante ou durante um intervalo de tempo determinado. Sendo assim, pode-se definir como a capacidade de uma planta industrial e seus equipamentos executarem suas tarefas durante o período em que eles forem planejados para produzir.

Segundo Takahashi e Takashi (2010), a melhoria da disponibilidade de uma planta industrial passa pelo aprimoramento da confiabilidade e da manutenibilidade, que são a redução da necessidade de manutenção, logo, evitar as avarias e garantir eficiência da manutenção.

Depreende-se então que para aumentar a disponibilidade deve-se evitar as avarias a todo custo, ao passo que no momento que ocorram, realizar a manutenção de forma eficaz.

Para o caso analisado, as plantas de processos devem operar continuamente a fim de processar as colheitas de cana-de-açúcar para que não haja perda do estoque. As facas devem estar em condições de operação, sem quebras e perda de forma, que acarretem na diminuição da eficiência do sistema.

Entretanto o tipo de desgaste abrasivo é recorrente em diversos setores industriais, ele é apontado como o mecanismo que envolve problemas industriais em 50% das ocorrências (LEITE; MARQUES,2009).

Nos equipamentos instalados em um fábrica podem haver muitos fatores de desgaste, que impõe aos elementos de máquina perda de material. Dentre eles estão: a abrasão, erosão, cavitação, corrosão e adesão (WAINER; BRANDI; DE MELO,1992).

Muitos setores tem seus custos de manutenção acrescido devido a abrasão, em geral, quanto mais agressivo for insumo a ser processado maiores serão as taxas

de deterioração dos seus ativos, como na indústria de mineração e sucroalcooleira, por exemplo.

Para Souza (2015) alguns fatores que acentuam o desgaste abrasivo nesse segmento industrial é o contato com a matéria-prima (cana-de-açúcar), elementos estranhos ao processo (metal, madeira, pedra e areia) e a alta velocidade de impacto (até 1200RPM).

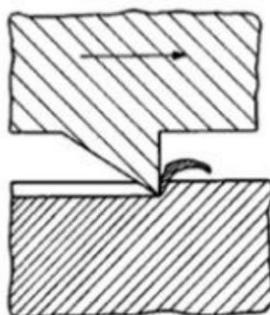
2.2 DESGASTE SUPERFICIAL

O desgaste por definição é um dano que ocorre em uma superfície sólida que inclui a perda progressiva de material, causado por movimento relativo entre superfícies (WAINER; BRANDI; DE MELO,1992).Existem três fatores que devem concorrer para que o fenômeno físico seja caracterizado como desgaste, são eles: dano à superfície, movimentação relativa e tipo de material (WAINER; BRANDI; DE MELO,1992).Segundo Wainer, Brandi e De Melo (1992), há ainda fatores que contribuem para a aceleração do mecanismo de desgaste, ou seja, fatores que aumentam a taxa de perda de material, como por exemplo, o choque, a corrosão e a fadiga.

2.3 ABRASÃO

O mecanismo de abrasão pode ocorrer de duas formas diferentes: dois corpos ou à três corpos. Segundo Norton, a abrasão a dois corpos ocorre quando a superfície mais dura e rugosa penetra sobre a superfície mais mole promovendo assim a sua deformação plástica levando ao arrancamento. A Figura 1, ilustra como uma superfície pode penetrar sobre a outra promovendo o seu desgaste.

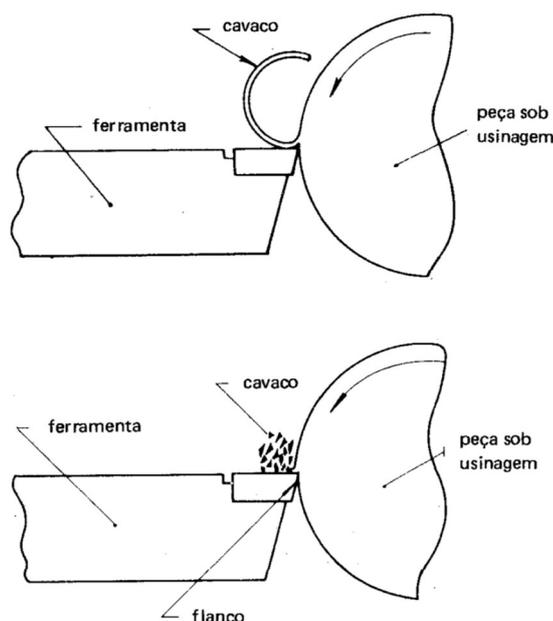
Figura 1 - Abrasão a dois corpos



Fonte: (FELIPE,2017)

Um exemplo desse tipo de abrasão é a usinagem, a ferramenta de corte é mais dura que o metal usinado fazendo que ocorra a remoção do material, dando origem ao cavaco. A Figura 2 ilustra o processo de usinagem, em que a ferramenta de corte promove a retirada de material da superfície da peça.

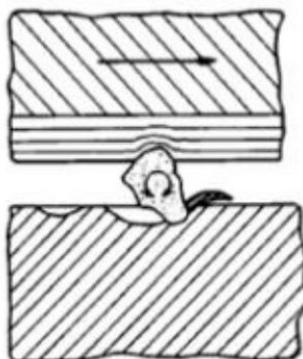
Figura 2 - Processo de usinagem



Fonte: (CHIAVERINI, 1977)

A abrasão a três corpos é definida por Norton (2013), como a introdução de partículas duras entre duas superfícies deslizantes, provocando a abrasão em uma ou nas duas superfícies, sendo uma superfície mais mole que a partícula. A Figura 3, ilustra como dá-se a interação com a introdução de uma partícula em meio a duas superfícies.

Figura 3 - Abrasão à três corpos



Fonte: (FELIPE,2017)

Considera-se um exemplo desse tipo de mecanismo o polimento, em que é introduzido uma partícula que atua como abrasivo. A Figura 4 ilustra o processo de polimento realizado na preparação metalográfica.

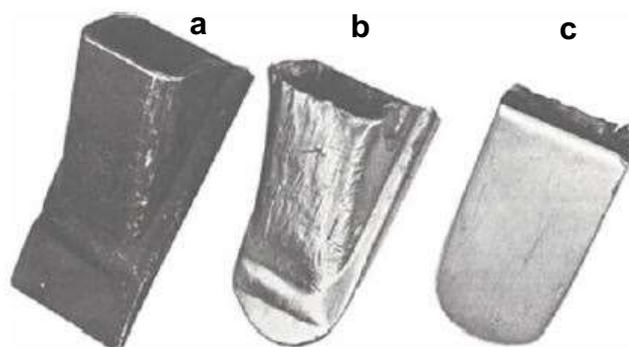
Figura 4 - Processo de polimento



Fonte: JHL2D Engenharia, 2014.

Conceitua-se então como abrasão um processo de remoção de massa das superfícies afetadas a uma taxa que pode ser ou não controlada (NORTON,2013). Para os equipamentos a abrasão pode significar perdas em produtividade e depreciação do ativo, além dos altos custos de manutenção e recuperação, para exemplificar o quanto isso pode significar em uma peça aplicada, a Figura 5 evidencia a atuação da abrasão (NORTON,2013).

Figura 5 - Abrasão em uma peça



Fonte: (NORTON,2013)

A peça ilustrada na Figura 5 é um dente de uma pá utilizada para escavação, ou seja, há atrito direto nos minerais do solo. Em *a* pode-se observar um dente novo sem deformações visíveis na superfície e com a pintura conservada, em *b* uma peça já utilizada em campo com deformações visíveis e sem a pintura e em *c* a parte de trás do dente com deformações visíveis devido ao contato direto com o solo.

Para atuar nesse tipo de cenário, requer-se um recobrimento da superfície desgastada para repor o material desgastado e um trabalho superficial para adequar a geometria concebida pelo projeto.

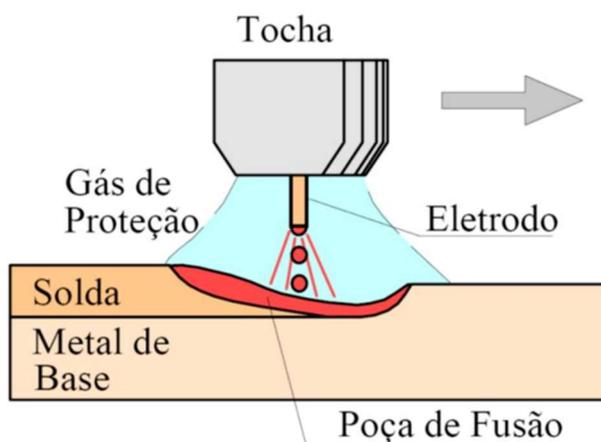
As técnicas para recobrimento de superfícies são diversas, pois os materiais para o revestimento dessas superfícies são vastos e cada um possui singularidades, como dureza do revestimento, tipo de acabamento e substrato. Além disso tem-se também a relação custo-benefício. A técnica que une o melhor custo-benefício são os processos de soldagem, que possuem versatilidade para as geometrias das peças, bem como variedade de processos e facilidade na sua aplicação.

2.4 SOLDAGEM MIG/MAG

O processo de soldagem MIG/MAG (*Metal Inert Gas/Metal Active Gas*) consiste na utilização de um arco com proteção gasosa (*GMAW – Gas Metal Arc Welding*), ou seja, ocorre a abertura de um arco entre o eletrodo e a peça, em que o arco é protegido por um fluxo gasoso (MARQUES,2011).

O gás de proteção é conduzido pelo bocal da tocha até o metal base, de forma que o eletrodo não tenha contato com o ar atmosférico, e o metal de adição fundido pelo arco deposite-se sobre o metal base também protegido pelo gás de proteção, como ilustra a Figura 6 (MARQUES,2011).

Figura 6 - Soldagem MIG/MAG



Fonte: (MARQUES, 2011)

A diferença entre a soldagem MIG e MAG é o tipo de gás de proteção utilizado. Na soldagem MIG (*Metal Inert Gas*) o gás de proteção é inerte, ou seja, pode ser um gás inerte puro ou uma mistura rica em gás inerte e a aplicabilidade abrange soldagem em materiais como aços-carbono, aços de baixa liga, média e alta liga, aços inoxidáveis, alumínio e ligas, magnésio e ligas e cobre e ligas (WAINER; BRANDI; DE MELO, 1992).

Já na soldagem MAG (*Metal Active Gas*) o gás é ativo, podendo ser exclusivo ou uma mistura de gás ativo, e essa soldagem pode ser aplicada em aços de baixo carbono e aços de baixa liga (WAINER; BRANDI; DE MELO, 1992).

2.4.1 Modos de transferência metálica

No processo MIG/MAG o arco elétrico é estabelecido entre o eletrodo metálico e a peça de trabalho. O arco proporciona a geração de calor, fundido as peças de trabalho e o arame que é transferido para a poça de fusão (MARQUES,2011).

Wainer, Brandi e De Melo (1992) elencam 4 tipos de transferência metálica, que são: globular, curto-circuito, por pulverização axial e rotacional ou por arco pulsado. Há outros tipos de transferência, como afirma Marques (2011), elas se apresentam quando tem variação do material, do gás de proteção e parâmetros de soldagem.

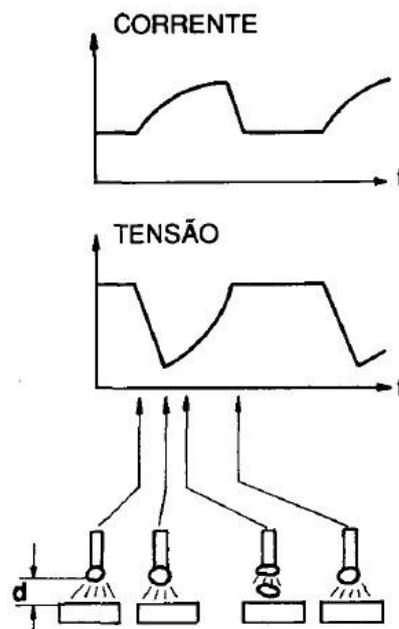
2.4.1.1 Transferência Globular

Segundo Wainer, Brandi e De Melo (1992) a transferência globular ocorre devido a densidade de correntes baixas sendo independente do gás de proteção aplicado. O mecanismo de transferência metálica se dá pela formação da gota na ponta do eletrodo, com diâmetro sensivelmente maior que o diâmetro do eletrodo. A quantidade de calor transferida a peça tem valor intermediário se comparado aos demais modos de transferência (WAINER; BRANDI; DE MELO, 1992).

Segundo Marques (2011) o arco tem características mais estáveis se comparadas a transferência por curto-circuito. Porém durante a soldagem há um nível mais elevado na quantidade de respingos. Esse tipo de transferência apresenta características ligadas a formação da gota, como dificuldade de soldar fora de posição sendo mais recomendada a soldagem na posição plana visto a formação da gota na ponta do arame (WAINER; BRANDI; DE MELO, 1992).

Com relação a característica do cordão de solda, pode gerar falta de penetração, falta de fusão ou ainda excesso de reforço no cordão de solda (WAINER; BRANDI; DE MELO, 1992). A Figura 7, ilustra o perfil e formação da gota e o comportamento da corrente e da tensão.

Figura 7 - Relação corrente e tensão para transferência globular



Fonte: (WAINER; BRANDI; DE MELO, 1992)

2.4.1.2 Transferência por curto-circuito

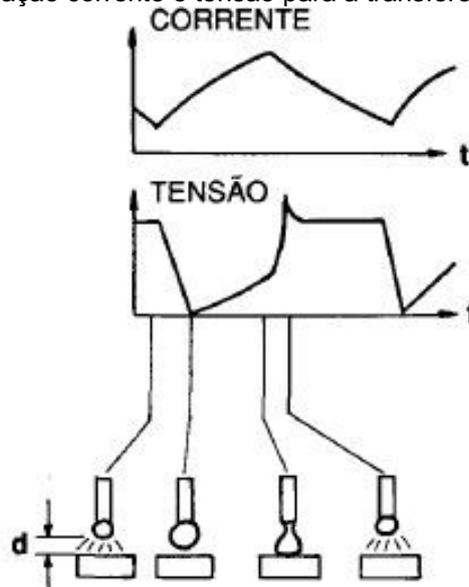
Segundo Marques (2011) a transferência por curto-circuito ocorre para valores baixos de corrente e tensão. Aponta ainda que esse modo é aplicado para soldagens em posições diferentes da plana ou na união de peças de baixa espessura em que não há necessidade de altas densidades de energia. Para Wainer, Brandi e De Melo (1992) o tipo de transferência por curto circuito ocorre em soldagens com eletrodos com diâmetros menores que os comumente utilizados, entre 0,8 a 1,2 mm, corroborando o que Marques (2011) afirmou a respeito da baixa densidade de corrente quando comparada a transferência globular.

O mecanismo de transferência ocorre devido à formação da gota na ponta do eletrodo e toca a poça fundida, configurando o curto circuito e devido a tensão superficial da poça, a gota é transferida (WAINER; BRANDI; DE MELO, 1992).

Segundo Wainer, Brandi e De Melo (1992) o calor transferido para a peça é menor quando comparada a transferência globular e é recomendada para a soldagem de chapas de espessura menor. A penetração não é grande e tem-se problemas de instabilidade e respingos.

Para a estabilidade do arco e a limitar a formação elevada de respingos, Marques (2011) aponta como alternativa o ajuste dos parâmetros de soldagem como ajustar a indutância da fonte de energia, fazendo com que o curto circuito ocorra de forma suavizada, com a corrente apresentando um valor máximo durante a ocorrência do curto circuito e que a ponta do eletrodo esteja imersa na cratera da poça de fusão. A Figura 8, ilustra o perfil, formação da gota, comportamento da corrente e da tensão, para a transferência de curto circuito.

Figura 8 - Relação corrente e tensão para a transferência curto circuito

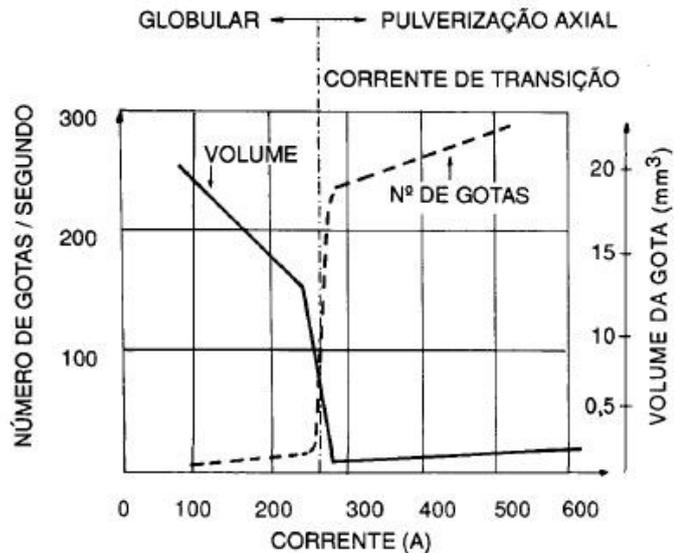


Fonte: (WAINER; BRANDI; DE MELO, 1992)

2.4.1.3 Transferência por pulverização

Segundo Wainer, Brandi e De Melo (1992), o diâmetro médio das gotas do metal fundido diminui de acordo com o aumento da corrente de soldagem. Há ainda um aumento no número de gotas ao passo que se reduz o volume, quando comparado a transferência globular, como ilustra a Figura 9.

Figura 9 - Comparação entre volume e número de gotas



Fonte: (WAINER; BRANDI; DE MELO, 1992)

O diâmetro nesse modo de transferência é menor que o diâmetro do eletrodo (MARQUES,2011). Esse processo de soldagem tem uma faixa estreita de corrente

chamada de “corrente de transição”, onde ocorre a alteração brusca na forma de transferência metálica de globular para spray ou aerossol (MARQUES,2011).

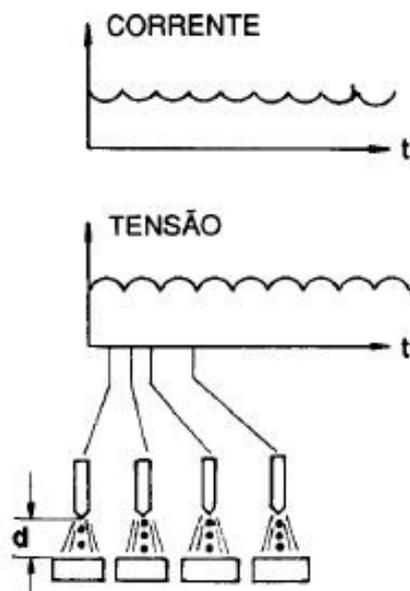
Por sua vez, Wainer, Brandi e De Melo (1992) aponta que há duas faixas de transição diferentes, a primeira é a corrente de transição globular/pulverização em que a pulverização é axial e a segunda que é quando a transferência metálica passa de axial para rotacional, caracterizada por uma transferência bastante instável pois a ponta do eletrodo tem movimentos circulares em relação ao seu eixo.

A distinção do tipo de transferência apontada por Wainer, Brandi e De Melo (1992) entre a pulverização axial e a radial, tem a origem na atuação de várias forças devido ao campo eletromagnético como afirma Marques (2011).

Segundo Wainer, Brandi e De Melo (1992) a transferência por pulverização ocorre com densidade de corrente elevadas e quando a proteção gasosa é com argônio ou misturas contendo argônio em grandes proporções.

Esse modo de transferência não apresenta a ocorrência de respingos e o cordão obtido é regular e suave, devido ao arco elétrico mais estável (MARQUES, 2011). A Figura 10, mostra o comportamento da tensão e da corrente durante o processo de transferência metálica por pulverização.

Figura 10 - Relação corrente e tensão para transferência por pulverização



Fonte: (WAINER; BRANDI; DE MELO, 1992)

2.4.1.4 Transferência por arco pulsado

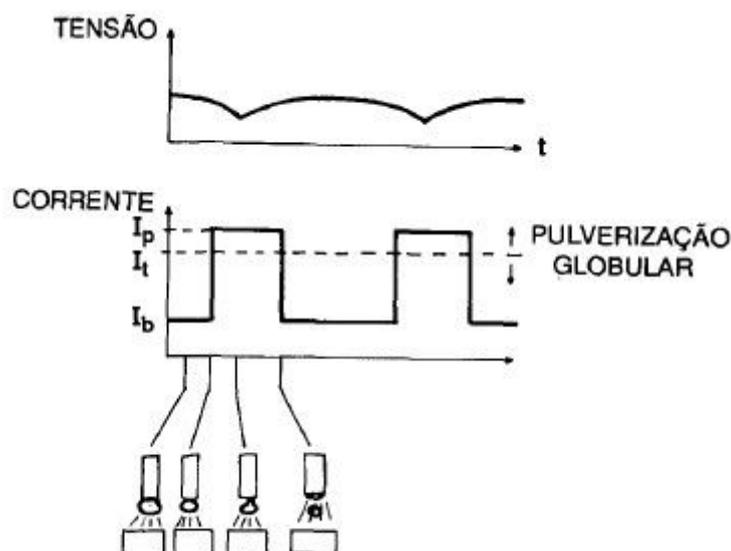
Esse processo de transferência é possível por meio da introdução de perturbações controladas na alimentação do arame e na corrente elétrica, devido a utilização de fontes eletrônicas (MARQUES,2011).

A transferência controlada com maior utilização é a pulsada, que tem uma transferência metálica semelhante a globular, porém com arco elétrico estável e uniforme, mediante a utilização de dois níveis de corrente sendo um superior e outro inferior, com um período de tempo determinado (MARQUES,2011).

O comportamento da corrente é explicado por Wainer, Brandi e De Melo (1992), em que no nível inferior de corrente a mesma é tão baixa que há apenas o início da fusão do arame, no nível superior a corrente é elevada de forma que ultrapassa a corrente da transferência por spray e ocorre a transferência de uma gota.

Nesse modo de transferência, Wainer, Brandi e De Melo (1992) explica que há a característica da transferência por spray com uma corrente média menor. Aponta ainda que o calor colocado na peça é menor se comparado com a transferência pulverizada axial. Sendo mais indicada para soldagens de chapas de reduzida espessura e fora de posição. A Figura 11, ilustra o comportamento da corrente e da tensão para a transferência metálica por arco pulsado.

Figura 11 - Relação corrente e tensão para transferência por arco pulsado.

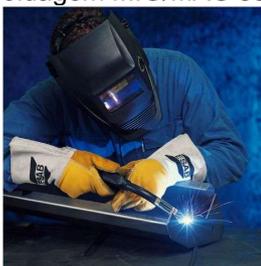


Fonte: (WAINER; BRANDI; DE MELO, 1992)

2.4.1.5 Vantagens do processo MIG/MAG

Segundo Wainer, Brandi e De Melo (1992), o processo de soldagem MIG/MAG é um processo semiautomático visto que a alimentação do arame é realizada de forma automática por um motor elétrico, ao passo que o soldador é responsável pelo deslocamento da tocha, porém pode ser facilmente adaptada para a soldagem automática. A Figura 12, mostra a soldagem sendo realizada com o auxílio de um soldador, que é o responsável pelo deslocamento da tocha.

Figura 12 - Soldagem MIG/MAG semiautomática



Fonte: (ESAB, 2004)

Devido ao equipamento e a alimentação automática, não é requerido do soldador habilidade ou grande experiência com o processo, ou seja, pode ser operado com facilidade. Pode-se destacar ainda que o processo é muito suscetível aos parâmetros de soldagem, por exemplo, velocidade de deslocamento, a distância da tocha da peça soldada e conseqüentemente a distância do arco.

Devido a isso é possível aplicar o processo automático de soldagem, para as peças que podem ser transportadas com facilidade para o local de execução da soldagem, com a utilização de robôs, que são dispositivos que tornam o caminho automático, promovendo seu deslocamento e o controle de sua velocidade (ESAB,2005).

Com o advento do desenvolvimento de braços robóticos e dos controladores, é possível realizar a soldagem em uma vasta gama de posições, peças e dimensões, como ilustrado na Figura 13.

Figura 13 - Braço robótico para processo MIG/MAG



Fonte: (ESAB,2019)

Como resultado tem-se o aumento da qualidade dos cordões de solda, visto a ausência do processo de remoção de escória e alta taxa de deposição se comparada ao processo de eletrodo revestido, por meio do melhor controle dos parâmetros de soldagem, impactando assim na competitividade e produtividade dos processos de produção (MARQUES,2011).

A alta deposição é colocada como vantagem do processo, visto que pode ser aplicado para o recobrimento de peças para a manutenção, quando comparados aos processos de eletrodo revestido, por exemplo. O processo MIG/MAG é apontado por Marques (2011) como o mais adequado.

2.4.1.6 Desvantagens do processo MIG/MAG

Como citado anteriormente, sabe-se que o processo é fortemente influenciado pelos parâmetros de soldagem, o que segundo Marques (2011) é uma desvantagem, visto são interdependentes, ou seja, ao ajustar certos parâmetros outro pode

apresentar variação, requerendo ajustes finos para que o resultado final da soldagem seja alcançado.

O custo dos equipamentos para soldagem MIG/MAG apresenta-se elevado se comparado ao processo de eletrodo revestido, Wainer, Brandi e De Melo (1992) expõe uma ordem de custo 10 vezes maior quando comparado o processo MIG/MAG ao eletrodo revestido.

Marques (2011) segue a mesma linha de Wainer, Brandi e De Melo (1992) e aponta o custo do equipamento MIG/MAG em comparação ao eletrodo revestido, porém salienta a pouca variedade de consumíveis. Com os constantes desenvolvimentos tecnológicos a tendência é que os custos sejam diminuídos cada vez mais.

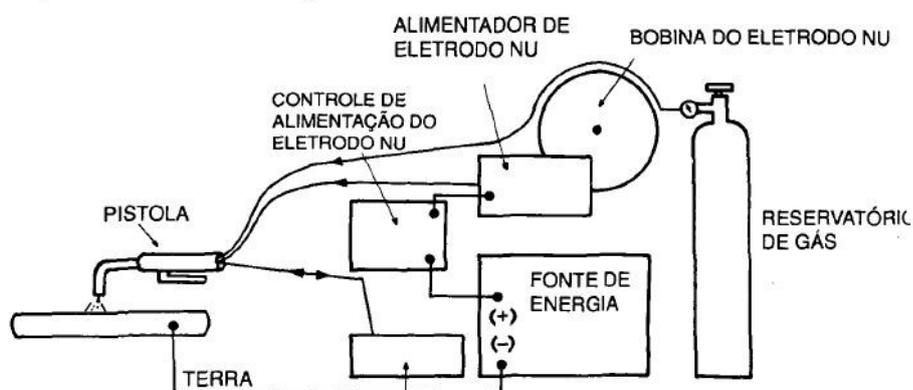
2.5 EQUIPAMENTO DE SOLDAGEM

São considerados equipamentos de soldagem, todos os componentes que concorrem para que o processo seja realizado com segurança e qualidade, ou seja, são os componentes básicos ou auxiliar no processo (MARQUES,2011).

Para que haja a soldagem a tocha, fonte de energia, alimentador de arame e o cilindro de gás de proteção são considerados básicos para que o processo seja executado. Os dispositivos auxiliares são os posicionadores e sistemas de deslocamento que são utilizados na soldagem mecanizada (MARQUES,2011).

A Figura 14, ilustra um sistema de soldagem MIG/MAG contendo os componentes básicos para o processo.

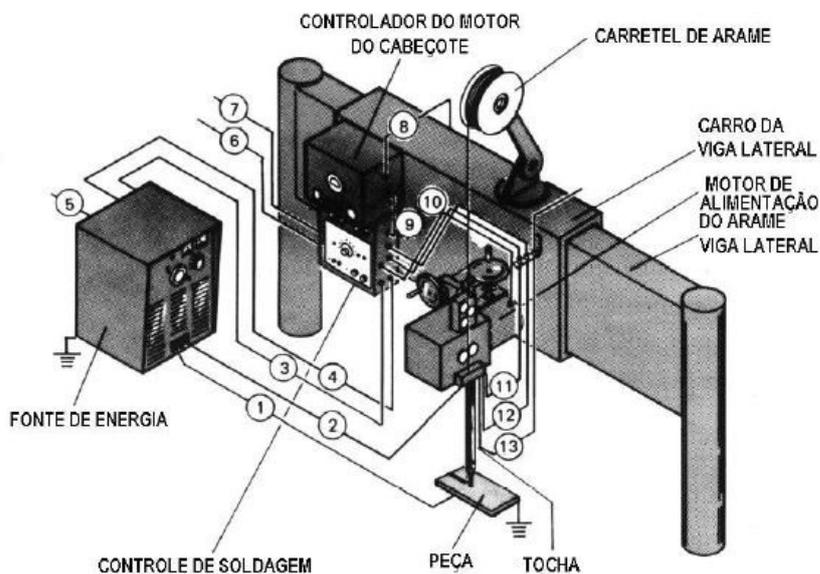
Figura 14 - Equipamentos de soldagem MIG/MAG



Fonte: (WAINER; BRANDI; DE MELO, 1992)

A Figura 15, ilustra um sistema de soldagem MIG/MAG com a aplicação de um sistema de deslocamento automático para peças de grande porte.

Figura 15 - Equipamentos de soldagem MIG/MAG automático



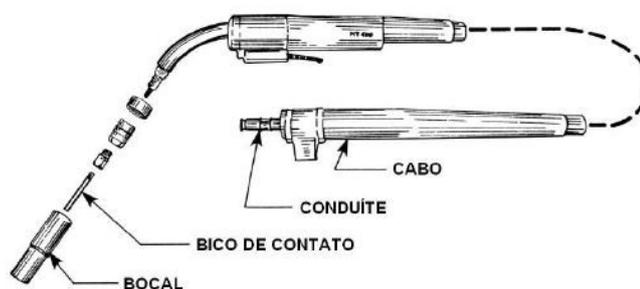
Fonte: (ESAB,2005)

2.5.1 Tocha

A tocha é o componente pelo qual são canalizados o gás de proteção e o arame até a peça, energizando-o para que ocorra a abertura do arco e o início do processo de soldagem por meio do acionamento do gatilho (MARQUES,2011).

A Figura 16, ilustra uma vista explodida de uma tocha típica.

Figura 16 - Tocha MIG/MAG



Fonte: (ESAB,2005)

O bico de contato, parte que compõe a tocha, consiste em um tubo com fabricação em cobre, em que o seu diâmetro é sensivelmente superior ao diâmetro do arame eletrodo, como afirma Marques (2011). Ele ainda tem o papel de auxiliar na condução da energia de soldagem até o eletrodo e no direcionamento do arame até a

peça (ESAB,2005). Como recomendação dos fabricantes, deve ser respeitado a relação entre o bico de contato e o diâmetro do arame, visto que ele deve ser muito bem fixado e deve ser centralizado no bocal (ESAB,2005).

Já o bocal pode ser fabricado em cobre ou cerâmica (Marques,2011), tendo como função o direcionamento do fluxo da proteção gasosa até a zona de soldagem, logo, existe uma relação entre o diâmetro do bocal e as correntes empregadas na soldagem, diâmetros maiores são utilizados para emprego de correntes maiores devido a poças de fusão mais largas. Ao passo que os bocais menores são utilizados em soldagens com baixa correntes (ESAB,2005).

2.5.2 Fonte de energia

Segundo Wainer, Brandi e De Melo (1992), a fonte de energia utilizada em processos de soldagem MIG/MAG pode ser um gerador ou um retificador, pois ambos possuem a característica de potencial constante.

Quanto as características internas, Marques (2011) afirma que as fontes convencionais são geralmente do tipo transformador-retificador visto que o processo utiliza corrente contínua, ou ainda geradores (com baixa utilização) em que é possível ajustar a tensão de saída entre 18 a 50V. A Figura 17 ilustra uma fonte de energia para a soldagem MIG/MAG.

Figura 17 - Fonte de energia



Fonte: (ESAB,2019)

A tensão utilizada no processo é determinante para o comprimento do arco, visto que pode ocorrer uma variação abrupta na velocidade de alimentação do eletrodo ou ainda uma mudança na tensão do arco, por sua vez a fonte aumenta ou diminui bruscamente a corrente, por conseguinte, a taxa de fusão do arame.

A taxa de fusão do arame se altera de forma automática para reestabelecer o comprimento original do arco. O que pode ser ajustado na tensão de saída da fonte (ESAB,2005).

A fonte possui características elétricas específica que pode ser elencado: a tensão do arco, a inclinação da curva tensão-corrente da fonte e a indutância, por meio destas se pode controlar o calor do arco e os respingos, por exemplo (ESAB,2005).

2.5.3 Alimentador de arame

O sistema de alimentador de arame é o conjunto formado pelo motor de alimentação de arame e o controle de soldagem. Ele é responsável por tracionar o arame do carretel e alimentar o arco elétrico (ESAB,2005).

Segundo Marques (2011), o motor de alimentação é caracterizado por um motor de corrente contínua e fornece ao arame uma velocidade constante.

O controle de soldagem regula a velocidade de ajuste independentemente do peso, bem como o fim e o início do processo de soldagem por meio do sinal emitido pelo gatilho da tocha (ESAB,2005).

O alimentador tem sistemas de regulagem que devem ser configurados antes do início da soldagem, como ilustra a Figura 18.

Figura 18 - Alimentador de arame



Fonte: (ESAB,2019)

Marques (2011) explica ainda que o alimentador do arame não tem relação com a fonte de energia do conjunto MIG/MAG, porém ajustando a velocidade de alimentação ajusta-se a corrente de soldagem fornecida pela máquina.

2.5.4 Cilindro de gás de proteção

O reservatório de gás é definido por Wainer, Brandi e De Melo (1992) como um cilindro de aço com o gás mais adequado a soldagem. Segundo Marques (2011) a fonte de gás pode ser um cilindro com gás ou mistura de gases a serem utilizados na proteção do cordão soldado. Os cilindros disponíveis comercialmente são mostrados pela Figura 19.

Figura 19 - Suprimento de gás.



Fonte: (OM GAS & CHEMICALS,2019)

O sistema de gás de proteção é basicamente a válvula em que existe um regulador de pressão, um medidor de vazão e uma válvula de controle do gás que entra no sistema (WAINER; BRANDI; DE MELO,1992). Deve ser controlado para que o cordão de solda e o arco não seja afetado por uma vazão elevada ou reduzida demais a ponto de não proteger ou estabilizar o arco elétrico. A Figura 20 ilustra esse tipo de válvula para regulação da vazão de gás.

Figura 20 - Válvula de vazão de gás



Fonte: (LINCOLN ELETRIC, 2019)

A função do gás de proteção no processo de soldagem é expulsar o ar atmosférico objetivando evitar a contaminação da poça de fusão. Essa contaminação pode ser causada por elementos presentes no ar atmosférico como nitrogênio (N_2), oxigênio (O_2) e o vapor d'água (H_2O) (ESAB,2005). Os gases de proteção devem apresentar características básicas pois as mesmas afetam diretamente o

desempenho do processo de soldagem. Dentre elas estão as características térmicas a temperaturas elevadas; reação do gás com os elementos do metal base e do arame; e o efeito do gás no modo de transferência do metal (ESAB,2005).

2.5.5 Sistema de deslocamento

O sistema de deslocamento acontece por meio de equipamentos que determinam o caminho que a tocha e conseqüentemente o arco elétrico irá realizar na peça; é responsável por controlar a velocidade de deslocamento. A Figura 18 ilustra um sistema de deslocamento linear e o sistema de fixação da tocha.

Figura 21 - Sistema de deslocamento



Fonte: (SPS, 2020)

2.6 PARÂMETROS DE SOLDAGEM

2.6.1 Tensão do arco

A tensão do arco está compreendida entre a ponta do arame e a peça, sendo que está associada ao comprimento do arco. Essa distância também afeta características como o modo de transferência de metal e o formato do cordão de solda (ESAB,2015).

Segundo Marques (2011), no processo MIG/MAG a tensão empregada é constante e a tensão do arco pode ser considerada relativamente estável e constante pelo próprio sistema, porém a sua maior sensibilidade é com relação aos parâmetros elétricos que interferem diretamente no aspecto e qualidade do cordão de solda, requerendo um ajuste minucioso.

Faz-se uma avaliação dos impactos do emprego de maiores e menores níveis de tensão, que tem efeitos combinados nos cordões de solda.

Uma avaliação a respeito da tensão e do comprimento de arco feito por Wainer, Brandi e De Melo (1992), relaciona a tensão baixa a comprimento de arco menores e que para correntes menores que 22 A favorecem a transferência curto-circuito. Já a transferência globular e pulverização são favorecidas quando aplicadas correntes superiores a 22 A, dependendo do valor com relação a corrente de transição.

A aplicação de tensões elevadas resulta em maiores larguras e maior tendência de formação de respingos. Para tensões baixas ocorre uma maior instabilidade do arco e a transferência por curto circuito (MARQUES,2011).

Do aspecto da qualidade do cordão de solda, pode-se introduzir porosidade, respingos em excesso e mordedura, no caso de da tensão ser elevado. Para tensões baixas pode se verificar porosidade e sobreposição (WAINER; BRANDI; DE MELO,1992).

A respeito da energia, Wainer, Brandi e De Melo (1992) descreve dois tipos de energia, a primeira é a energia contida no arco elétrico e a segunda é a energia de aquecimento do eletrodo que ocorre por efeito Joule. E com isso elenca-se três fatores que podem influenciar a energia. São eles: mudança da distância entre a tocha e a peça, mudança da faixa de tensão de soldagem da fonte de energia e a velocidade de alimentação de arame.

2.6.2 Velocidade de deslocamento

A velocidade de deslocamento, é o percurso da tocha em determinado intervalo de tempo (ESAB,2015). A velocidade de soldagem impacta a energia de soldagem e por sua vez, a quantidade de calor que é transferido para a peça (MARQUES,2011).

Segundo Marques (2011), velocidades de soldagem que apresentam valores baixos podem gerar problemas metalúrgicos devido ao fluxo de energia elevado, além de elevar o custo da operação.

Para velocidade de soldagem elevadas podem causar problemas relacionados a geometria do cordão soldado, como menores larguras, reforços e penetrações (MARQUES, 2011).

Em caso que há excessivos valores de velocidade de soldagem podem aparecer problemas como mordeduras, falta de fusão e/ou penetração devido à baixa taxa de transferência de calor para a peça (MARQUES,2011).

2.6.3 Velocidade de alimentação de arame

A energia de soldagem é afetada pela distância entre o arame de alimentação e a peça. A velocidade de alimentação é o parâmetro que contribui para a aproximação e o afastamento do arame da peça.

A regulagem da tensão e da corrente depende da distância que o arame esta da peça, sendo assim, a velocidade de alimentação pode contribuir para esse ajuste que deve ser realizada de forma suave para que o arco não perca a sua estabilidade.

A relação entre a velocidade alimentação e a energia consiste que à medida que a distância aumenta o comprimento do arco também aumenta e com isso a energia necessária para fundir o arame (WAINER; BRANDI; DE MELO,1992).

Para os arames há uma larga variedade de metais e ligas metálicas, de diversas características como dimensões, qualidade superficial, dureza e composição química. Um dos consumíveis amplamente utilizados é o arame tubular.

Segundo Wainer, Brandi e De Melo (1992) o aumento da velocidade de alimentação resulta no aumento da corrente de soldagem que por sua vez altera também a distância do arco.

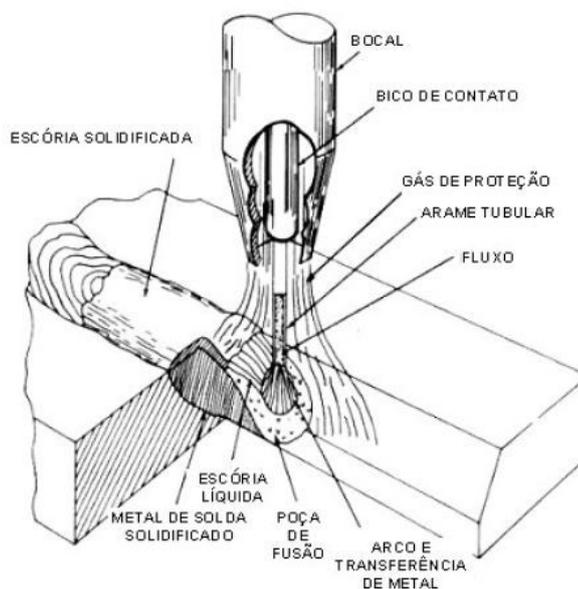
2.7 SOLDAGEM COM ARAME TUBULAR

A soldagem MIG/MAG e a com arame tubular (FCAW – *Flux-Cored Arc Welding*) tem apresentado largo aumento de utilização a nível mundial, devido a substituição de processos manuais em detrimento dos processos semiautomáticos e automáticos, visando o aumento da produtividade (MARQUES,2011).

O processo de soldagem com arame tubular (FCAW) é caracterizado como pela aglutinação dos metais e suas ligas por meio da abertura de um arco elétrico

entre a peça e o eletrodo tubular. A soldagem com arame tubular é ilustrada pela Figura 22.

Figura 22 - Soldagem com arame tubular



Fonte: (BRACARENSE,2005)

O arco e o cordão de solda são protegidos pelo fluxo de soldagem e pode ser auxiliado pelo gás de proteção, ou seja, tem-se duas fontes de proteção uma provida internamente pelo arame e outra externa provida pelo gás de proteção. Tem como funções desoxidar e refinar o metal de solda, inserir no cordão de solda elementos de liga e estabilizar o arco (MARQUES,2011).

Há duas variações nesse processo, uma contempla que toda a proteção necessária advém do fluxo do eletrodo, definido como arame auto protegido. Outra modalidade é pelo fluxo de gás geralmente o CO_2 (MARQUES, 2011).

A soldagem com arames tubulares guarda as vantagens do processo MIG/MAG como processo semi automático, alta taxa de deposição, alta produtividade e as vantagens da soldagem com eletrodo revestido como alta versatilidade, possibilidade ajustar a composição química do metal de solda e facilidade de operação em campo (MARQUES,2011). A Figura 23, mostra a classificação dos arames tubulares da AWS (*American Welding Society*).

Figura 23 - Classificação AWS

Especificação	Consumível
AWS A 5.9	Arames de aço inoxidável com pó metálico interno
AWS A 5.15	Arames para soldagem de ferro fundido
AWS A 5.18	Arames tubulares de aço carbono com pó metálico interno
AWS A 5.20	Arames tubulares de aço carbono com fluxo interno
AWS A 5.21	Arames para revestimento
AWS A 5.22	Arames tubulares para soldagem de aço inoxidável
AWS A 5.29	Arames de aços de baixa liga com fluxo interno

Fonte: (MARQUES, 2011)

Um tipo de arame tubular muito importante para os processos de soldagem com vistas ao revestimento são os arames tubulares com pó metálico (*Metal Cored*), que consiste na aplicação de pó metálicos, ferro-ligas e baixa fluxo a base de minerais (MARQUES,2011).

Esse tipo de deposição é realizado através da proteção gasosa, ou seja, o arame não promove uma atmosfera protetora. Os gases de proteção que são utilizados nesse processo, podem ser uma mistura de argônio e gás carbônico (MARQUES,2011).

Já o revestimento duro, consiste na aplicação de revestimento soldado contendo elemento de liga sob uma superfície com o objetivo de recuperar a peça desgastada (WAINER; BRANDI; DE MELO,1992).

Nesse contexto, o tipo de arame com pó metálico se apresenta como uma boa alternativa para recuperar peças por meio da deposição de revestimento contra o desgaste (MARQUES,2011).

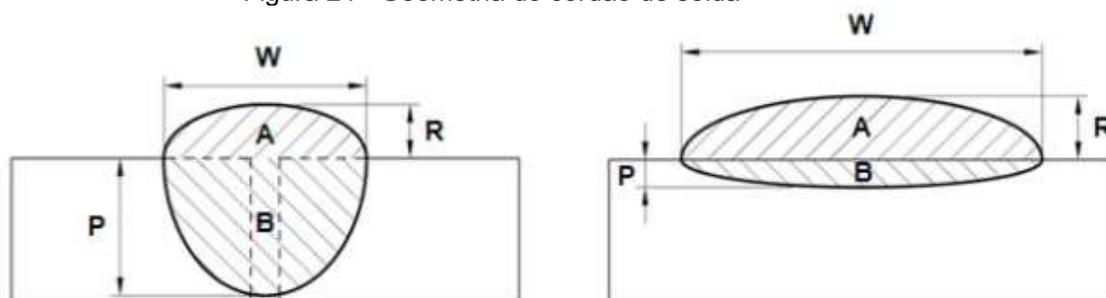
2.8 GEOMETRIA DO CORDÃO DE SOLDA

Segundo Marques (2011) há uma grande quantidade de termos para definir as características técnicas e o formato dos cordões de solda, que ele expõe como largura (W), reforço (R) e penetração (P).

Há uma diferença fundamental entre a soldagem convencional (união de duas peças) e a soldagem de revestimento (sob uma superfície), na primeira o objetivo é obter a máxima penetração para garantir a união das peças e da segunda o objetivo é obter grandes larguras, altos reforços e baixas penetrações (GOMES, 2010).

A Figura 24, ilustra a representação dos termos e a diferença nos parâmetros.

Figura 24 - Geometria do cordão de solda



Fonte: (GOMES, 2010)

A diluição é a relação entre a área de penetração (B) e a área da seção transversal do cordão de solda (A+B) (BONANNI, 2011). A diluição pode ser calculada com base na equação 1.

$$D = \left(\frac{B}{A + B} \right) \times 100 \quad (1)$$

O índice de convexidade é a relação entre o reforço (R) e a largura do cordão de solda (W) (SILVA, 2000). Para a determinação do índice de convexidade é definida pela equação 2.

$$IC = \left(\frac{R}{W} \right) \times 100 \quad (2)$$

Segundo Silva (2000), os valores de Índice de Convexidade (IC) mais adequados apresentam valores próximos a 30%, superiores a esse valor os cordões geram reforço excessivo e pequena penetração.

2.9 ESTRUTURA METALÚRGICA DO REVESTIMENTO

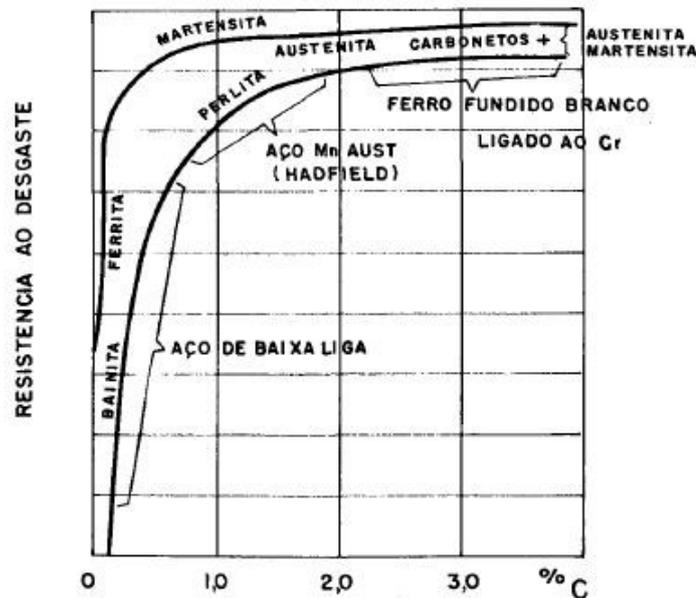
A compreensão dos mecanismos de desgaste a que uma peça é submetida é fundamental para o seu projeto e a definição do material que deve ser utilizado para que não aja a sua deterioração acelerada e aumente seu tempo de vida útil.

Os projetos de engenharia lançam mão de materiais, tratamentos e processos de recuperação para que suas peças atendam aos requisitos de segurança e operação.

Em projetos mecânicos o material mais amplamente utilizado são os aços, que alia as propriedades mecânicas que cobrem uma vasta variedade, sua versatilidade de utilização em processos de fabricação e o seu custo.

Para projetos em que o desgaste seja o mecanismo mais severo para a peça, o aumento dos níveis de carbono em aços se traduz em aumento de resistência como pode ser observado na Figura 25 (WAINER; BRANDI; DE MELO, 1992).

Figura 25 - Dureza x teor de carbono



Fonte: (WAINER; BRANDI; DE MELO, 1992)

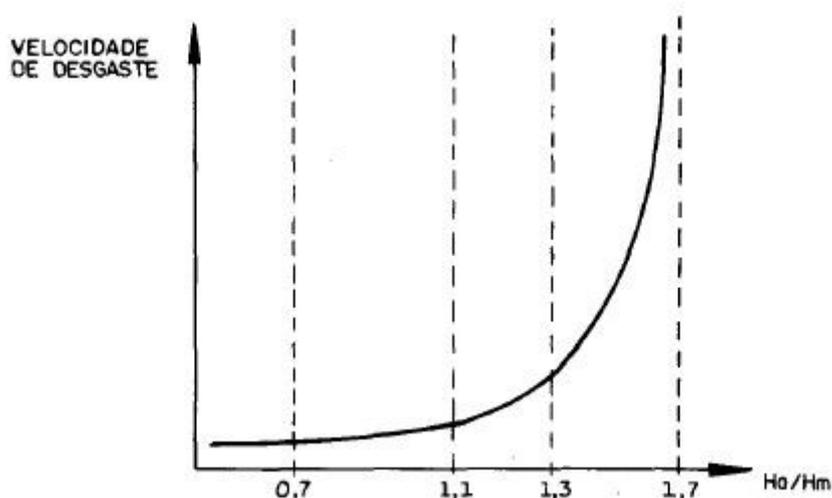
2.9.1 Revestimento duro

A soldagem de revestimento é colocada com uma alternativa de manutenção de componentes que são afetados por desgaste para redução dos custos, na prevenção e manutenção de peças já desgastadas (WAINER; BRANDI; DE MELO, 1992).

Como apresenta Wainer, Brandi e De Melo (1992), para revestimento é necessário elencar e analisar as características que a peça tem com relação ao mecanismo de desgaste em que podem concorrer vários ao mesmo tempo, definição da composição e do tipo de metal de adição e o procedimento de soldagem que se adequa a esses fatores.

No caso específico da abrasão, há uma relação entre a dureza do metal com a dureza do abrasivo e o seu impacto na velocidade de desgaste, como ilustrado na Figura 26.

Figura 26 - Relação dureza do abrasivo e do metal x velocidade de desgaste



Fonte: (WAINER; BRANDI; DE MELO, 1992)

Segundo Wainer, Brandi e De Melo (1992), não há classificação de metais de adição que englobe a gama de ligas para revestimento duro. As classificações que existem têm como base a composição química do metal de adição depositado.

Wainer, Brandi e De Melo (1992) apresentam uma classificação de metais de adição baseada na composição química em que as ligas ferrosas são divididas como:

- Classe 1 – Aços de baixa e média liga com 1 a 12% de elemento de liga.
- Classe 2 – Aço alta liga, incluindo os aços rápidos e aço ao manganês.
- Classe 3 – Ligas a base de ferro com 25 a 50% de elemento de liga.
- Classe 4 – Ligas a base de cobalto, níquel e níquel-cromo.
- Classe 5 – Ligas com dispersões de carbonetos de tungstênio entre 38 a 60% em matriz de liga dúctil.

Ao definir a liga para o revestimento duro deve-se avaliar a soldabilidade, os custos e a compatibilidade metalúrgica, como recomendam Buchanan, Shipway e McCartney (2007).

A luz da análise dos fatores elencados os revestimentos a base de ferro são populares em alguns segmentos industriais devido ao baixo custo e fácil aplicação. Salienta-se ainda que as ligas com alto teor de Fe-Cr-C, quando aplicadas geram carbonetos que promovem resistência a abrasão (LEITE; MARQUES, 2009).

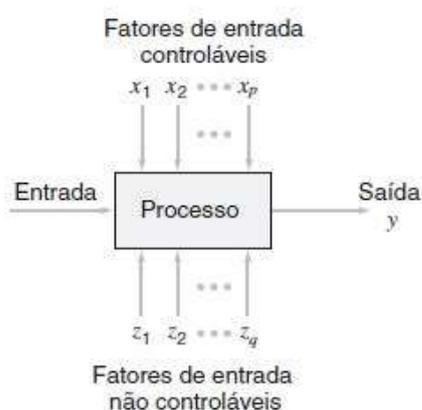
2.10 PLANEJAMENTO EXPERIMENTAL

Os estudos científicos são pesquisas realizadas para apresentar hipóteses comprovando-as ou refutando-as, utilizando método científico que incluem passos como a observação, questionamento, estabelecimento de hipóteses, a experimentação a análise dos dados e a apresentação dos resultados.

Para problemas de ordem física a observação dos fenômenos é de suma importância identificar os fatores que podem atuar em um determinado sistema que podem afetar as características do seu estado.

Um sistema ou processo pode ser caracterizado como um conjunto de itens, como: entrada, fatores de entrada controláveis, fatores de entrada não controláveis, processo e saída, como apresentado pela Figura 27 (MONTGOMERY, 2009).

Figura 27 - Modelo de processo



Fonte: (MONTGOMERY,2009)

A entrada pode ser considerada como um material sofrerá transformação pelo processo que resultará no material de saída, sendo assim, o processo pode ser considerado um conjunto de máquinas, pessoas e métodos que promovem transformação em um material em estado A para o estado B (MONTGOMERY, 2009).

As variáveis de processo podem ser definidas como controláveis e incontroláveis, ou seja, as variáveis controláveis podem ser manipuladas tendo-se controle direto sobre sua atuação no sistema, ao passo que as variáveis incontroláveis não, muito embora elas possam ser controladas para efeito de testes. As variáveis incontroláveis podem ser chamadas de ruídos (MONTGOMERY, 2009).

Como parte de metodologia científica a experimentação é a etapa que exige do pesquisador atenção e ser metuculoso, visto que a partir dessa etapa que são gerados os resultados que embasarão suas conclusões.

Os procedimentos experimentais do estudo de um sistema constituem-se em uma série de testes nos quais são realizadas mudança intencionais nas variáveis de processo de modo a se observar e identificar variações na saída do processo.

O planejamento experimental, é uma ferramenta extremamente importante de engenharia para promoção de melhoria em processos de fabricação bem como no desenvolvimento de novos processos, segundo Montgomery (2009).

O resultado da aplicação dos planejamentos experimentais inclui a melhoria da produção, redução da variabilidade, redução do tempo de desenvolvimento e redução dos custos.

Os planejamentos experimentais são largamente utilizados em metodologias de melhoria continua como o *Six Sigma*, para avaliar e comparar configurações do sistema, avaliar materiais alternativos e determinar os parâmetros chave de um processo (MONTGOMERY, 2009).

Para a concepção de um planejamento experimental, Montgomery (2009) apresenta um esboço do procedimento recomendado, apresentado pela Figura 28.

Figura 28 - Procedimento de um planejamento experimental

- | | | |
|----------------------------------|--|---|
| Planejamento
pré-experimental | <ol style="list-style-type: none"> 1. Reconhecimento e relato do problema 2. Escolha dos fatores e dos níveis 3. Seleção da variável resposta 4. Escolha do planejamento experimental 5. Realização do experimento 6. Análise dos dados 7. Conclusões e recomendações |] em geral, feitas simultaneamente
ou em ordem inversa |
|----------------------------------|--|---|

Fonte: (MONTGOMERY,2009)

É fundamental para um planejamento experimental a escolha dos fatores e níveis, pois são os requisitos que o sistema deve ser submetido e suas variações, ou seja, os fatores são características do sistema ou processo que são alvo de experimentação e os níveis são a quantidade de variação dos fatores (MONTGOMERY, 2009).

A variável resposta é o que se busca observar a partir do planejamento experimental, sendo assim a variável resposta é o fenômeno que sofre alteração de um estado para outro com a variação dos fatores e seus níveis (MONTGOMERY, 2009).

A definição do planejamento experimental deve-se considerar o tamanho da amostra, seleção de quantidade de corridas experimentais e a ordem de execução principalmente. Grandes quantidades de fatores e níveis tornam o procedimento experimental extensivo, não permitindo uma varredura completa dos fatores não indicado para processos pouco amadurecidos (MONTGOMERY, 2009).

A realização do experimento é vital para a confiabilidade dos dados obtidos, é nesse ponto que o sucesso do experimento é definido.

Para o tratamento dos dados pode-se lançar mão de vários métodos baseando principalmente em métodos estatísticos, outro método que pode auxiliar na elucidação dos dados é o método gráfico atuando como complemento para o tratamento dos dados (MONTGOMERY, 2009).

2.10.1 Método da superfície de resposta

A metodologia da superfície de resposta (MRS) é apontada como uma alternativa aos planejamentos fatoriais e fatoriais fracionados, pois os últimos são indicados para uma varredura dos fatores, ou seja, utilizando-os são identificados fatores que afetam o desempenho de um processo (MONTGOMERY, 2009).

Quando são identificados os fatores que mais influenciam um processo, e se tem por objetivo a sua otimização a metodologia da superfície de resposta tem sido muito utilizada e com bom desempenho (MONTGOMERY, 2009).

Essa metodologia se utiliza de técnicas matemáticas e estatísticas para modelar e analisar um conjunto de dados que é influenciado por diversas variáveis, ou seja, em processos em que tem alta variabilidade causada por diversos fatores a metodologia pode ser aplicada, cujo o objetivo é a otimização dessa resposta (MONTGOMERY, 2009).

O MRS foi desenvolvido em 1950, com aplicação inicialmente na indústria química, entretanto nos últimos 20 anos tem sido amplamente aplicado em diversos

setores industriais, como o de processo de fabricação como usinagem, corte e junção (MONTGOMERY, 2009).

Uma função que descreve um processo com dependência em dois fatores (x_1 , x_2) levando em conta também os ruídos (ε), ou seja, considera-se os fatores não controláveis do processo, a equação 3 representa o sistema com épsilon sendo o ruído (MONTGOMERY, 2009).

$$y = f(x_1, x_2) + \varepsilon \quad (3)$$

Observado o valor esperado para o processo então a equação 4 representa a superfície de resposta (MONTGOMERY, 2009).

$$E(y) = f(x_1, x_2) \quad (4)$$

A metodologia de superfície de resposta não fornece relação entre a variável de saída e as independentes, por esse motivo é necessária uma aproximação. É utilizado o método dos mínimos quadrados para estimar os parâmetros dos polinômios para que minimizam a soma de quadrados dos erros do modelo (MONTGOMERY, 2009).

A superfície de resposta pode ser aproximada por um modelo de primeira ordem, como indicado pela equação 5 (MONTGOMERY, 2009).

$$y = \beta_0 + \beta_1 x_1 + \beta_2 x_2 + \dots + \beta_k x_k + \varepsilon \quad (5)$$

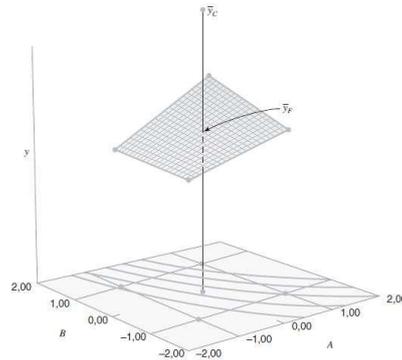
Ou ainda por um modelo de segunda ordem, com um polinômio de ordem mais elevada, como expresso pela equação 6 (MONTGOMERY, 2009).

$$y = \beta_0 + \sum_{i=1}^k \beta_i x_i + \sum_{i=1}^k \beta_{ii} x_i^2 + \sum_{i < j=1}^k \sum_{j=1}^k \beta_{ij} x_i x_j + \varepsilon \quad (6)$$

Se a superfície ajustada de forma que ela se aproxime adequadamente da verdadeira função resposta, pode-se dizer que a análise pode ser equivalente ao sistema real (MONTGOMERY, 2009).

Os resultados podem ser expressos de forma gráfica, como ilustra a Figura 29 (MONTGOMERY, 2009).

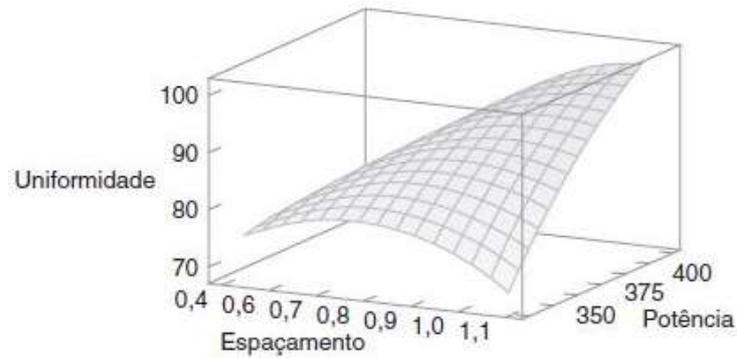
Figura 29 - Representação gráfica do RMS



Fonte: (MONTGOMERY,2009)

As representações gráficas podem ser expressas por uma superfície tridimensional, como ilustra a Figura 30 (MONTGOMERY, 2009).

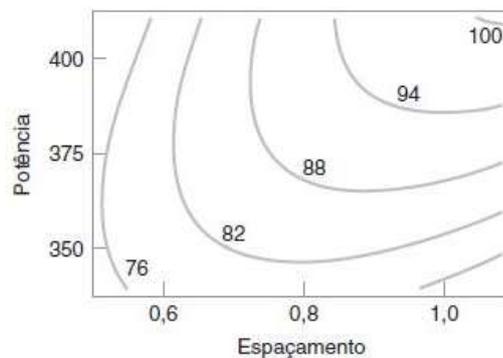
Figura 30 - Superfície de contorno



Fonte: (MONTGOMERY,2009)

Outra forma de facilitar a visualização da superfície de resposta é utilizar gráficos de contorno, como ilustra a Figura 31 (MONTGOMERY, 2009).

Figura 31 - Gráfico de contorno



Fonte: (MONTGOMERY,2009)

2.10.2 Central circumscribed composite

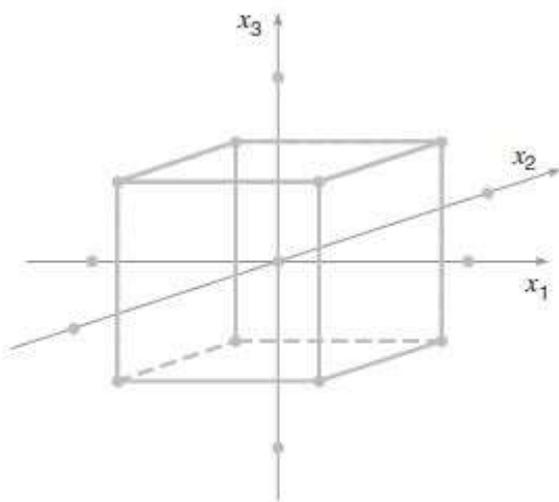
O planejamento composto central (PCC ou DCC – *Design Central Composite*) é aplicado para o ajuste de um modelo de superfície de resposta de segunda ordem, sua utilização é explicada pelo fato de apresentar relativa eficiência em relação ao número de rodadas experimentais necessárias, em outras palavras ele apresenta resultado satisfatório testando menos fatores diretamente (MONTGOMERY, 2009).

Segundo Montgomery, os planejamentos compostos central com k fatores exige 2^k rodadas fatoriais, $2 \cdot k$ rodadas axiais e pelo menos um ponto central (utilizam-se 3 a 5 pontos centrais) (MONTGOMERY, 2009).

Porém esse planejamento pode ser transformado em um planejamento rotacional, isso pode ser feito mediante a escolha de um espaçamento adequado axial, representado por alfa.

O planejamento fatorial é representado por um cubo, em que as corridas experimentais e seus parâmetros são representados pelos seus vértices, a Figura 32 ilustra a disposição dos fatores (x_1 , x_2 e x_3). Os vértices do cubo têm como distância ± 1 unidade do centro (MONTGOMERY, 2009).

Figura 32 - Disposição dos fatores



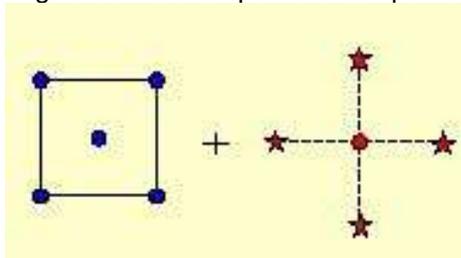
Fonte: (MONTGOMERY,2009)

Um aspecto importante dos planejamentos rotacionais (CCD – *Central Composite Design*) é que eles têm parte fatorial ou a fatorial fracionada. Segundo o *Engineering Statics Handbook*, os pontos do cubo são chamados de center-points, estão a mesma distância do centro do cubo. Os pontos definidos pelo valor assumido

por alfa (α), são chamados de star-points (ENGINEERING STATICS HANDBOOK, 2020).

A Figura 33, ilustra a disposição para um planejamento de dois parâmetros (ENGINEERING STATICS HANDBOOK, 2020).

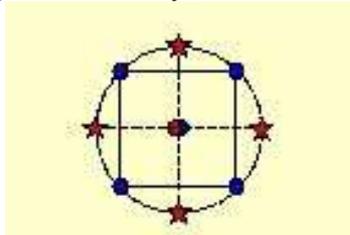
Figura 33 - Center points e star points



Fonte: (ENGINEERING STATICS HANDBOOK,2020)

Os pontos unidos representam o planejamento rotacional, como ilustra a figura 34. (ENGINEERING STATICS HANDBOOK,2020)

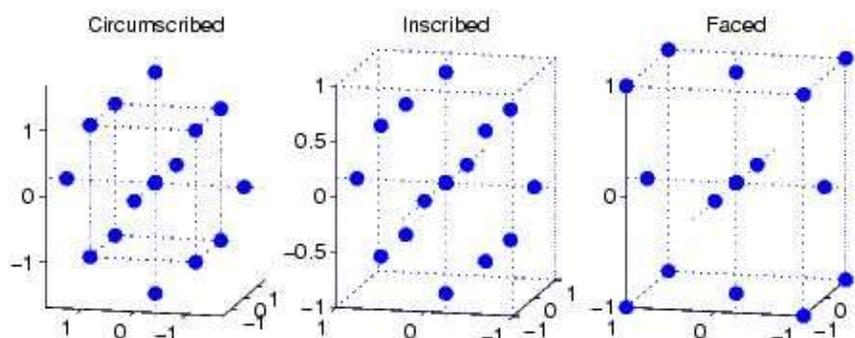
Figura 34 - Planejamento rotacional



Fonte: (ENGINEERING STATICS HANDBOOK,2020)

Para os planejamentos rotacionáveis, a determinação do alfa (α) pode assumir valores de distanciamento do centro, sendo assim, há uma classificação específica para cada valor de alfa assumido, como ilustra a Figura 35 (ENGINEERING STATICS HANDBOOK,2020).

Figura 35 - Planejamentos rotacionáveis.

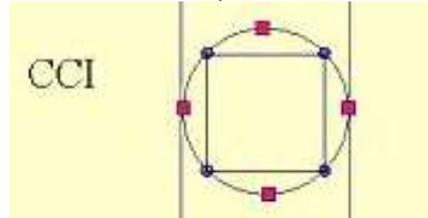


Fonte: (STATISTIC TOOLBOX,2020)

Para os planejamentos experimentais em que os fatores têm níveis máximos, ou seja, não se pode variar em níveis de maiores intensidades, os stars points são dispostos dentro desse limite, para tanto o valor de alfa é menor que um.

A Figura 36, mostra como é disposto esse planejamento rotacional classificado como inscrito (*Central Composite Inscribed*) (ENGINEERING STATICS HANDBOOK,2020).

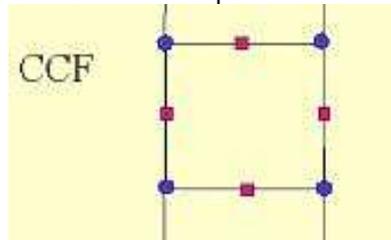
Figura 36 - Central Composite Inscribed



Fonte: (ENGINEERING STATICS HANDBOOK,2020)

O planejamento experimental que tem como stars points posicionados na face do cubo (CCF – *Central Cube Faced*) tem o α igual a 1. A Figura 37 ilustra a disposição desses pontos (ENGINEERING STATICS HANDBOOK,2020).

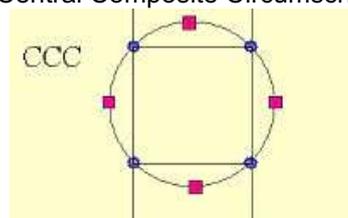
Figura 37 - Central Composite Faced



Fonte: (ENGINEERING STATICS HANDBOOK,2020)

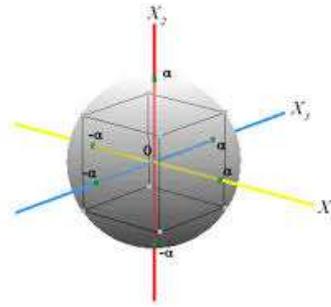
O planejamento rotacional em que α assume valor maior que 1, é chamado de *Central Composite Circumscribed*. Nesse modelo o cubo é envolto por uma esfera, esses pontos estabelecem novos níveis máximos para o parâmetro. A Figura 38, ilustra o modelo CCC (ENGINEERING STATICS HANDBOOK,2020).

Figura 38 - Central Composite Circumscribed



Fonte: (ENGINEERING STATICS HANDBOOK,2020)

A disposição em 3D do modelo CCC é ilustrada na Figura 39 (MINITAB,2020).

Figura 39 - Central Composite Circumscribed

Fonte: (MINITAB,2019)

O valor de alfa é determinado com base de rodadas fatoriais (2^k), seguindo a equação 7 (ENGINEERING STATICS HANDBOOK,2020).

$$\alpha = (2^k)^{1/4} \quad (7)$$

3 METODOLOGIA

Os materiais e os procedimentos utilizados na condução do estudo serão apresentados nessa seção. Durante o trabalho foram realizados desde o projeto experimental, confecção, preparação, avaliações e ensaios das amostras, análise dos revestimentos, análise das propriedades mecânicas e as características do cordão de solda até a análise da microestrutura.

3.1 PLANEJAMENTO EXPERIMENTAL

O planejamento experimental utilizado foi a metodologia de superfície de resposta (MRS) com ajuste do modelo de segunda ordem um planejamento composto central (DOE) com o valor da distância axial (α) maior que 1, caracterizando um planejamento rotacionável *Central Composite Circumscribed*.

São avaliados 3 parâmetros, velocidade de alimentação de arame, velocidade de deslocamento e tensão. Os fatores são variados em três níveis (alto, médio e baixo), como apresentado na Tabela 1.

Tabela 1 - Parâmetros e níveis

Níveis	Tensão (V)	Velocidade de Soldagem (cm/min)	Velocidade de alimentação de arame (m/min)
Alto	26	35	4,50
Médio	24	30	3,25
Baixo	22	25	2,00

Fonte: Autoria própria

O valor da distância axial (α) com os parâmetros listados na tabela 1, é determinado pela equação 5, que resulta no valor para $\alpha = 1,682$. A partir das informações apresentadas é utilizado o software de análise estatística chamada Minitab®.

Com o software é possível gerar as corridas experimentais, podendo ser codificadas, como mostra a Tabela 2.

Tabela 2 - Corridas experimentais codificadas

Níveis	Tensão (V)	Velocidade de Soldagem (cm/min)	Velocidade de alimentação de arame (m/min)
1	0	0	0
2	-1	1	1
3	0	0	0
4	0	0	0
5	1	-1	-1
6	0	0	-1,68
7	1	1	1
8	0	0	0
9	-1	-1	-1
10	-1,68	0	0
11	1	1	-1
12	0	0	0
13	0	0	1,68
14	-1	-1	1
15	0	0	0
16	0	-1,68	0
17	1	-1	1
18	-1	1	-1
19	0	1,68	0
20	1,68	0	0

Fonte: Autoria própria

As corridas experimentais são geradas de forma aleatória, mesclando os fatoriais fracionados dando origem aos centers points, e são geradas 6 corridas em nível baixo (-1,68) e nível alto (1,68) para os 3 fatores, esses são os stars points o design de experimento CCC.

Ou ainda, a tabela decodificada, em que são apresentados os valores dos níveis que devem ser utilizados nas corridas experimentais, como pode ser observado pela Tabela 3.

Tabela 3 - Corridas experimentais decodificadas

Níveis	Tensão (V)	Velocidade de Soldagem (cm/min)	Velocidade de alimentação de arame (m/min)
1	24	30	3,25
2	22	35	4,50
3	24	30	3,25
4	24	30	3,25
5	26	25	2
6	24	30	1,15
7	26	35	4,50
8	24	30	3,25
9	22	25	2
10	20,6	30	3,25
11	26	35	2
12	24	30	3,25
13	24	30	5,53
14	22	25	4,50
15	24	30	3,25
16	24	21,5	3,25
17	26	25	4,50
18	22	35	2
19	24	38,5	3,25
20	27,4	30	3,25

Fonte: Autoria própria

O software é utilizado ainda para a análise estatística dos resultados obtidos, gerando os gráficos de contorno e as superfícies de resposta, bem como as equações de segunda ordem.

3.2 PREPARAÇÃO DAS AMOSTRAS

As amostras foram confeccionadas utilizando as instalações da Universidade Tecnológica Federal do Paraná, no campus de Ponta Grossa, Laboratório de soldagem do departamento de Engenharia Mecânica.

Os cordões de solda foram depositados em matrizes de aço 1020 comercial, com composição química indicada pela Tabela 4.

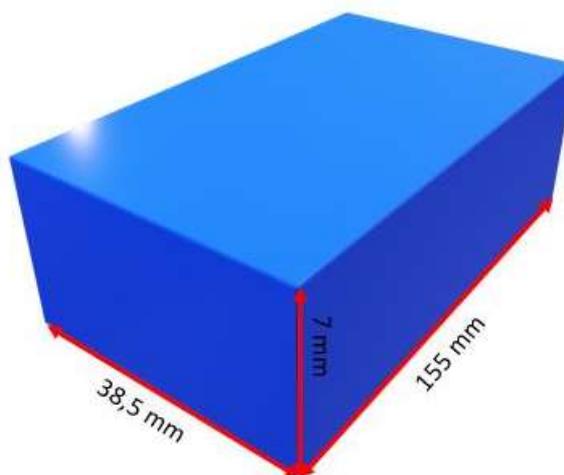
Tabela 4 - Composição do aço 1020

Material	Fe	C	Mn	P	S
Aço 1020 (Porcentagem massa em %)	99,08 - 99,53	0,17 – 0,23	0,30 - 060	0,040	0,050

Fonte: Aatoria própria

As dimensões dos corpos de prova em aço são de 155 mm de comprimento, 38,8 mm de largura e 7 mm de espessura, como ilustra a Figura 40.

Figura 40 - Dimensões do corpo de prova.



Fonte: Aatoria própria

Para depositar os cordões de solda foi utilizado o conjunto semiautomático para soldagem MIG-MAG SMASHWELD 315 da ESAB, com faixa de tensão de 19 a 45V e corrente de 50 a 315 A. A Figura 41 ilustra maiores informações sobre o conjunto.

Figura 41 - Especificações Técnicas Conjunto Semiautomático MIG/MAG Smashweld 315

Classe ABNT	I		
Faixa de tensão em vazio (V)	19 - 45		
Faixa de corrente/tensão (A/V)	50/16 - 315/35		
Corrente nominal (A)	180		
Cargas autorizadas			
Fator de Trabalho %	30	60	100
Corrente de soldagem (A)	315	250	180
Tensão em carga convencional	35	27	23
Alimentação elétrica trifásica (V - 50/60 Hz)	220/380/440		
Potência aparente nominal (KVA)	7		
Classe térmica	H (180 °C)		
Grau de proteção	IP 22		
Dimensões (L x C x A - mm)	370 x 850 x 830		
Peso (Kg)	Smashweld 315	125	
	Smashweld 315 Topflex (sem alimentador de arame)	120	

Fonte: (ESAB,2005)

O conjunto semiautomático de soldagem SMASHWELD combina a utilização de um alimentador de arame MEF 30, com velocidade de alimentação de 1,50 a 22 m/min e diâmetros de arame tubular de 0,90 a 1,20 mm.

A Figura 42 ilustra maiores informações sobre o alimentador de arame MEF 30.

Figura 42 - Especificações técnicas alimentador de arame MEF30

Alimentação elétrica (V - 50/60 Hz)	42	
Moto-reductor	cc - imã permanente	
Faixa de velocidade do arame (m/min)	- Smashweld 315	1,50 - 19,00
	- MEF 30	1,50 - 22,00
Faixa de diâmetro de arame (mm)	- sólido	0,60 - 1,20
	- ligas de alumínio	0,80 - 1,20
	- tubular	0,90 - 1,20
Peso do alimentador de arame MEF 30 - sem arame (Kg)	17	

Fonte: (ESAB,2005)

O arame utilizado nos procedimentos foi de 1,6 mm. Composição na Tabela 5.

Tabela 5 - Composição química Arame tubular

Material	C	Si	Mn	Cr	P	S
Arame tubular 1,6 mm (Porcentagem massa em %)	4,40	0,30	0,30	27,00	N.D.	N.D.

Fonte: Autoria própria

O gás de proteção utilizado nos procedimentos experimentais foram uma mistura de gás carbônico e ar, na proporção de 25% e 75% respectivamente.

Para o deslocamento da tocha, foi utilizado o Tartilope V1. O sistema consiste em uma unidade de controle (a), um dispositivo mecânico (b) e um suporte para a tocha (c), como ilustra a Figura 43.

Figura 43 - Sistema de deslocamento



Fonte: (SPS, 2020)

O sistema possui autonomia de 5 a 160 cm/min com resolução de 0,2 cm/min, com eixo de deslocamento X e ajuste manual em Y, Z e A. O dispositivo mecânico possui trilho de 1,18m.

Para o monitoramento da tensão e corrente foi instalado um sensor de efeito Hall, para tensão utilizou-se o sensor LV 20-P e para a corrente o sensor LF 505-S, ambos sendo transcritos no software Lab View Signal Express®.

O sistema instalado para a confecção dos corpos de solda é ilustrado pela Figura 44.

Figura 44 - Sistema instalado para o estudo



Fonte: Autoria própria

3.3 PREPARAÇÃO DOS CORPOS DE PROVA

Os corpos de prova foram confeccionados usando o sistema instalado descrito na seção anterior e utilizando os parâmetros do design experimental, dando origem as peças utilizadas no estudo.

Como parte do estudo, os corpos de prova foram fotografados e medidos para aquisição de dados adicionais.

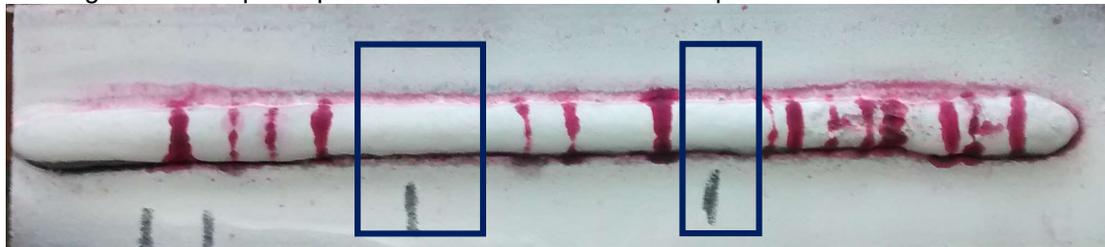
3.3.1 Ensaio de líquidos penetrantes

Foi utilizado o laboratório de materiais do departamento de Engenharia Mecânica da UTFPR, campus Ponta Grossa para a realização do ensaio não destrutivo de líquidos penetrantes.

O ensaio de Líquidos Penetrantes teve a finalidade de identificar regiões em que incidem trincas e porosidades, para fazer a seleção de zonas de corte para corpos de prova.

A Figura 45, ilustra um corpo de prova submetido ao ensaio de LP em que se pode observar a incidência de trincas e, a partir disso, selecionar áreas de corte para confecção de corpos de prova para análise metalográfica.

Figura 45 - Corpo de prova submetido ao ensaio de Líquidos Penetrantes



Fonte: Autoria própria

3.3.2 Preparação de amostras para análise metalográficas

Para a preparação dos corpos de prova para análise metalográfica, utilizou-se uma cortadeira metalográfica do laboratório de materiais do Departamento de Engenharia Mecânica da UTFPR, campus Ponta Grossa.

Os cortes foram realizados de forma transversal aos cordões de solda, de modo que a seção dos cordões mostrasse toda a sua extensão bem como do metal base.

Após o corte das seções, foi realizado o embutimento dos cordões de solda em uma matriz polimérica de baquelite, para que os cordões de solda estivessem fixos para os ensaios de dureza e microscopia ótica e de varredura.

Para o refinamento da superfície, foi realizado o lixamento da superfície dos cordões com a utilização de lixas n° 220, n° 400, n° 600, n° 800 e n° 1200.

Após a etapa de lixamento, foi realizado o polimento da superfície, com a utilização de uma suspensão de diamante com granulometrias de 3, 1 e 0,25 μm .

Para a observação da microestrutura, os corpos de prova foram imersos por 10 segundos em uma solução reativa, chama Villela cuja a composição é descrita na Tabela 6.

Tabela 6 - Composição reativo Villela

Reativo	Composição		
	HCl (ml)	C ₂ H ₆ OH (ml)	C ₄ H ₃ OH(NO ₂) ₃ (g)
Reativo Villela	5	100	1

Fonte: Autoria própria

O reativo é utilizado para identificação das fases Ferrita Delta e Austenita e Carbonetos.

3.3.3 Análise de microscopia ótica

Para avaliação da geometria do cordão de solda, foi utilizado o microscópio ótico *Zeiss Imager A2.m*, do laboratório de materiais do departamento de engenharia mecânica da UTFPR, campus Ponta Grossa.

Foram obtidas imagens do cordão de solda e medido as suas dimensões por meio do *Software Axio Imager 2*, pelo qual foi possível determinar a largura, o reforço e a penetração.

3.3.4 Análise de microscopia eletrônica de varredura

A avaliação da composição química do cordão de solda, foi utilizado o equipamento EDS marca Oxford acoplado ao microscópio eletrônico de varredura (MEV) Tescan modelo Veja 3, do laboratório de materiais do departamento de engenharia mecânica da UTFPR, campus Ponta Grossa.

O equipamento fornece relatório dos componentes de cada região analisada, indicando a porcentagem em massa de cada componente presente no material. Assim foi possível identificar as porcentagens de carbonetos presente no revestimento.

3.3.5 Ensaio de microdureza Vickers

O ensaio de microdureza Vickers foi realizado seguindo a norma ASTM E384-11 *Standard Test Method for Knoop and Vickers Hardness of Materials* que consiste na aplicação de uma carga de 300g sem pré-carga por um intervalo de tempo de 15s.

Esse ensaio foi realizado em um equipamento Shimadzu HMV G-20ST, no laboratório de materiais do departamento de engenharia mecânica da UTFPR, campus Ponta Grossa.

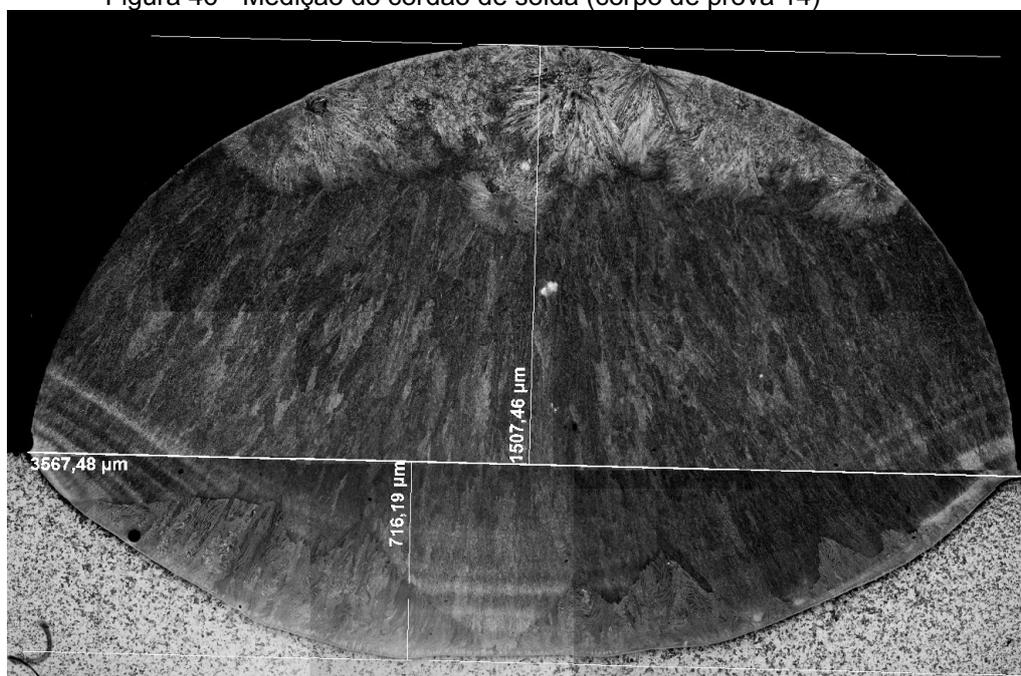
Os pontos ensaiados foram realizados em triplicata, cada uma com 3 medições no metal base, 1 medição na linha de fusão e 6 medições no metal de adição.

4 RESULTADO E DISCUSSÕES

A primeira etapa do trabalho realizou-se com a avaliação dos aspectos relacionados a geometria dos cordões de solda, verificando a largura, penetração, diluição e o índice de convexidade.

A Figura 46, ilustra como as medições foram obtidas por meio do software Imager A.2m, com a funcionalidade foi possível determinar as dimensões de largura, reforço e penetração. Foi possível também determinar as áreas para determinação da diluição.

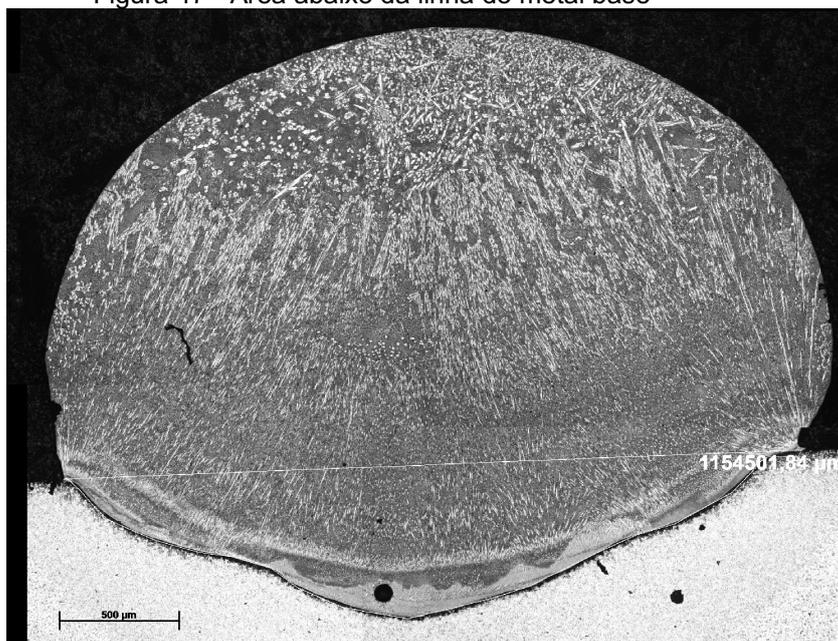
Figura 46 - Medição do cordão de solda (corpo de prova 14)



Fonte: Autoria própria

Para a determinação do índice de convexidade (IC) segundo SILVA (2000), é necessário medir as áreas do cordão de solda abaixo da linha do metal base, a medida tomada não considera o defeito como ilustra a Figura 47.

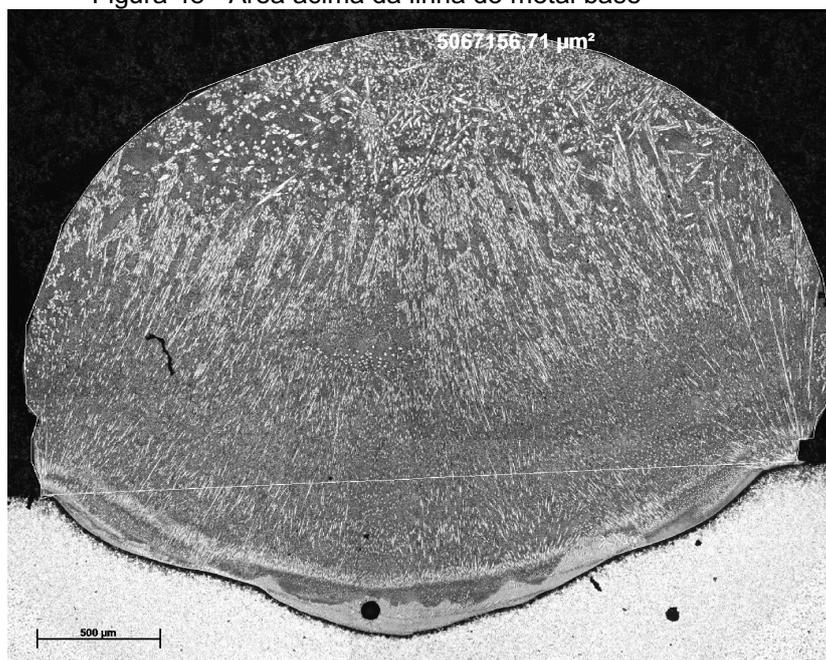
Figura 47 - Área abaixo da linha do metal base



Fonte: Autoria própria

A área acima do metal base é ilustrado pela Figura 48.

Figura 48 - Área acima da linha do metal base



Fonte: Autoria própria

Os dados são apresentados pela Tabela 7.

Tabela 7 - Medidas geometria do cordão de solda

Amostra	Largura (μm)	Reforço (μm)	Penetração (μm)	Diluição (%)	Índice de convexidade (%)
1	4285,58	1696,25	861,64	25,25	39,6
2	2806,22	2398,70	874,93	18,24	85,5
3	3635,57	1910,21	863,34	22,85	52,5
4	4053,32	2013,76	832,91	20,88	49,7
5	4350,02	1685,64	1097,38	32,30	38,8
6	3869,84	1598,10	692,90	24,02	41,3
7	4223,61	2189,29	1043,34	23,45	51,8
8	3388,89	2211,39	788,62	18,94	65,2
9	3317,08	2140,48	696,78	17,49	64,5
10	3116,43	2256,25	683,38	15,01	72,4
11	3282,82	2475,69	756,3	15,62	75,4
12	3550,14	1892,33	621,22	17,90	53,3
13	3382,58	2597,42	880,28	16,62	76,8
14	3567,48	1506,46	716,19	30,07	42,2
15	3113,09	1889,36	668,62	20,38	60,7
16	3691,41	2766,36	825,03	14,54	74,9
17	3436,37	2709,45	691,46	11,83	78,8
18	3103,23	1842,23	644,2	18,56	59,4
19	3002,40	2134,47	688,74	16,35	71,1
20	4444,22	2075,25	773,09	21,41	46,7

Fonte: Autoria própria

Analisando os valores de IC, os corpos de prova 1,5,6 e 14 apresentaram valores superiores a 30%, porém mais próximas demais corpos de prova. Valores próximos a 30% apresentam valores adequados (SILVA,2000).

Expandindo a análise e avaliando os valores de diluição, as amostras citadas também apresentam os valores elevados de diluição próximos ou superiores a 25%.

4.1.1 Análise de microdureza Vickers

O ensaio de verificação de microdureza Vickers foi realizado seguindo a metodologia já descrita na seção anterior, com medições em triplicatas, com três medições no metal base, 1 na linha de fusão e 6 no metal de adição.

A Tabela 8 apresenta os dados de micro dureza das amostras, também foi realizado a média dos valores encontrados para as faixas analisadas.

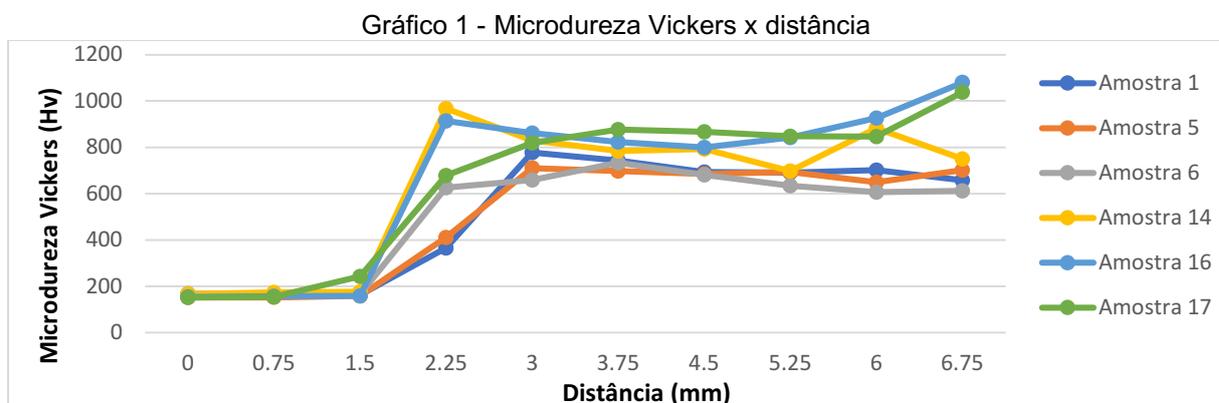
Tabela 8 - Microdureza Vickers

Amostra	Metal Base (Hv)	Linha de fusão (Hv)	Metal de adição (Hv)
1	160,67	364,67	710,22
2	155,78	307	666,89
3	164,78	414	705,5
4	152,78	728	754,83
5	154,78	410,67	689,55
6	166,22	625	654,27
7	150,67	537	765
8	151,33	637,33	725,78
9	174,89	573,33	701
10	107,67	595	551,56
11	167,67	758,67	813,17
12	158	749	814,39
13	173,67	629	829,94
14	171,89	968	789,5
15	163,11	642,67	729,33
16	156,78	913,67	888,5
17	183	678	882,17
18	176	756,67	729,94
19	150,11	927	733,44
20	157,11	593,33	704,22

Fonte: Autoria própria

Há uma intrínseca ligação entre a formação da microestrutura do cordão de solda e a microdureza, como apontado no estudo de Leite e Marques (2009), pois quanto há o aumento da diluição os elementos de liga são reduzidos e aumenta-se o conteúdo de carbono na camada revestida. Nesse caso, com menor a diluição observa-se a formação de carbonetos e conseqüentemente aumento da dureza.

As amostras 1,5,6,14,16 e 17 apresentaram os menores valores de diluição, e é possível observar que os revestimentos apresentam valores elevados de dureza.



Fonte: Autoria própria

O aumento dos valores de dureza do revestimento é devido a formação de carbonetos poligonais.

4.1.2 Análise da superfície de resposta

De posse dos dados de largura, reforço, diluição e micro dureza Vickers, utiliza-se o software Minitab® para estudar os dados e gerar as superfícies de resposta e os gráficos de contorno.

São apresentados somente os contornos de resposta, para que seja facilitada a análise, observando os valores de forma correta. As superfícies de resposta auxiliam na ilustração da superfície gerada pela equação de segunda ordem utilizada para a aproximação do modelo.

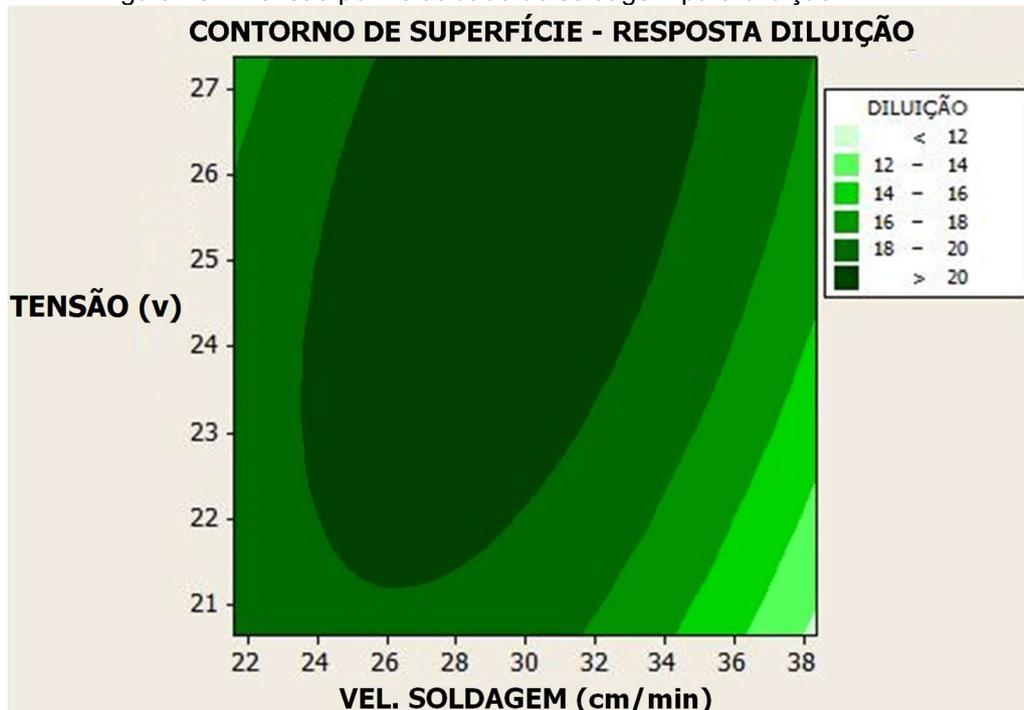
Como os fatores analisados por esse estudo são três, quando se faz uma projeção em dois eixos um fator não é visualizado, por este motivo o valor do fator omitido assume o seu valor intermediário, sendo para a tensão 24V, para velocidade de soldagem 30 cm/min e para alimentação do arame 3,25 m/min.

4.1.2.1 Diluição

Com relação aos valores de diluição é interessante menores valores, visto o seu impacto na microestrutura formada no cordão de solda e deve-se salientar o impacto direto na geometria do cordão de solda influenciando o índice de convexidade.

A superfície de resposta e o gráfico de contorno para a resposta de diluição, mantendo-se como constante a velocidade de arame no valor de 3 m/min é ilustrada pela Figura 49.

Figura 49 – Tensão por velocidade de soldagem para diluição



Fonte: Autoria própria

Segundo Lima (2008) diversos autores são unânimes em afirmar a importância da diluição no revestimento duro, e que baixas diluições são desejadas para que o revestimento seja pouco influenciado pela composição do metal base, por isso, baixas diluições culminam em revestimento com propriedades mais próximas as do metal de adição.

Há diversos processos de soldagem que podem ser utilizados para a deposição de revestimento duro o que impacta também a diluição do revestimento, para o processo utilizando arames tubulares os valores de diluição esperados são da faixa de 10 a 30% (LIMA,2008).

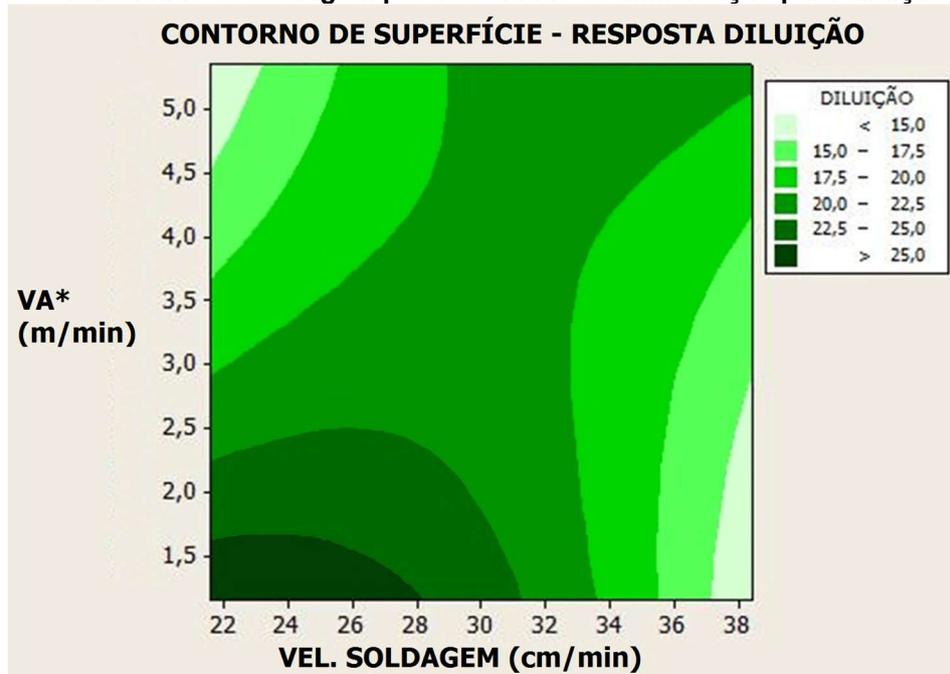
Segundo Lima (2008) devido ao aumento do aporte térmico a dureza do revestimento é reduzida devido ao aumento da diluição estabelecendo uma relação direta com o aporte de calor.

Os parâmetros mais favoráveis para a menores diluições são velocidade de soldagem superiores à 34 cm/min e uma grande faixa de tensões com o melhor parâmetro sendo representado pelo valor de 38 cm/min.

Pode-se afirmar ainda que para valores inferiores a 30 cm/min e a mesma faixa de tensões apresentam maiores diluições devido ao fato de aumentar-se o aporte térmico, como o observado na Figura 49.

A Figura 50 ilustra a resposta de diluição considerando a tensão constante de 24 V, suas respectivas superfícies de resposta e gráfico de contorno.

Figura 50 – Velocidade de soldagem por velocidade de alimentação para diluição



Fonte: Autoria própria

Observado a Figura 50, pode-se inferir que para valores de velocidade de soldagem superiores a 34 cm/min o aumento da velocidade de alimentação promove a redução da diluição, caso da velocidade de alimentação superiores a 3,5 m/min.

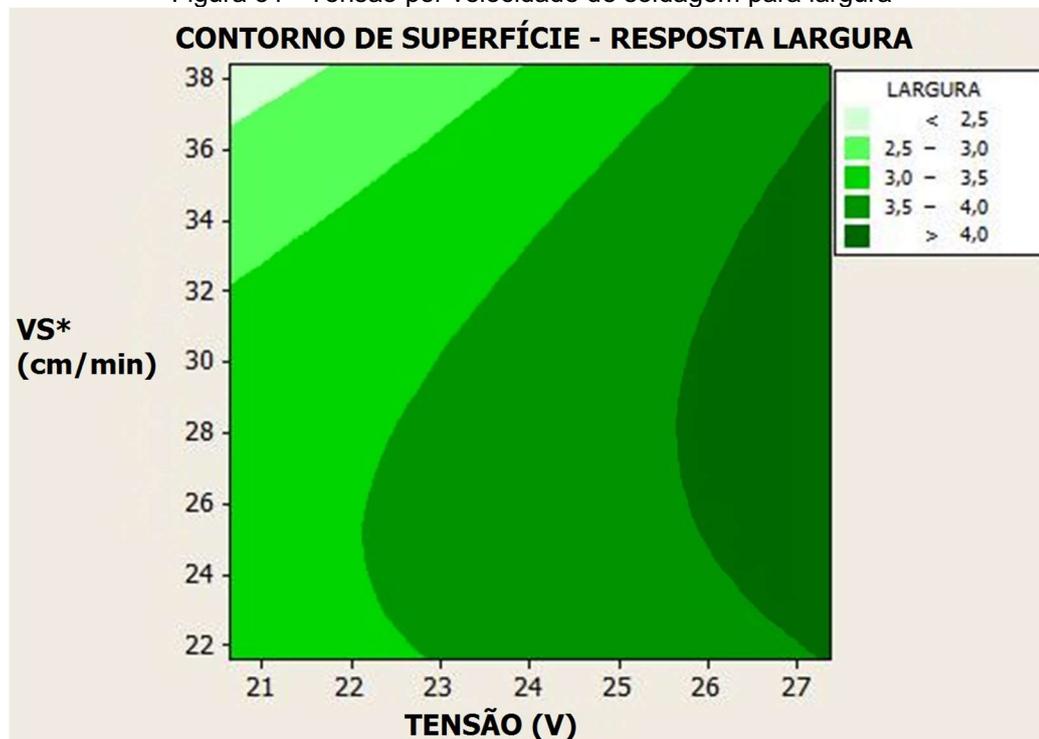
Ao compararmos a Figura 49 e a 50 observa-se uma variação da diluição maior para as alterações de velocidade de deslocamento do que a tensão, além de ser perceptível a maior zona de diluição favoráveis, ou seja, de menor valor.

4.1.2.2 Largura

A largura é uma característica da geometria do cordão de solda e está diretamente ligada ao índice de convexidade (IC), ela contribui para o índice de forma positiva quando valores maiores aliado com menores valores de reforço produzindo valores de IC próximos a 30%.

Para a relação entre tensão, deslocamento e a influência na largura, a superfície de resposta e o contorno de superfície considerando a velocidade de alimentação de arame constante em 3,25 m/min é ilustrado pela Figura 51.

Figura 51 - Tensão por velocidade de soldagem para largura

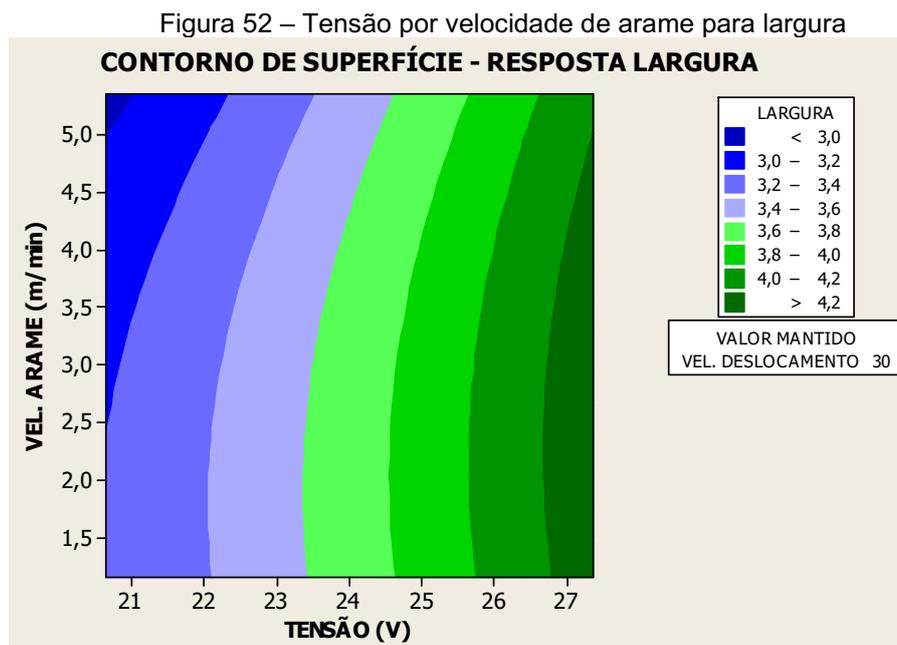


Fonte: Autoria própria

Analisando esse contorno de superfície pode-se observar pouca variação da largura, ou seja, alterando a velocidade de deslocamento ou a tensão o impacto na resposta de largura é reduzido.

Pode-se observar ainda que à medida que se aumenta a tensão há um aumento da largura.

Na Figura 52 é ilustrado a superfície de resposta e o contorno de superfície considerando a velocidade de deslocamento em 30 cm/min.



Fonte: Autoria própria

Ao se comparar a Figura 51 e 52, pode-se verificar que há uma maior variação dos valores de largura, ou seja, pode-se atingir uma gama de valores de largura à medida que se varia os parâmetros.

E como observado na Figura 52, também é possível verificar que ao aumentar a tensão do sistema pode-se atingir valores maiores de largura. Isso pode ser atribuído ao fato que quando se aumenta a tensão há um aumento do arco voltaico o que culmina no aumento da largura do cordão de solda.

Essa análise se faz de suma importância para identificar quão sensível é a interação entre os parâmetros, visto que, na Figura 51 tem-se um menor grau de variação e na Figura 52 tem-se um maior grau de variação analisando somente a interação com dois fatores somente.

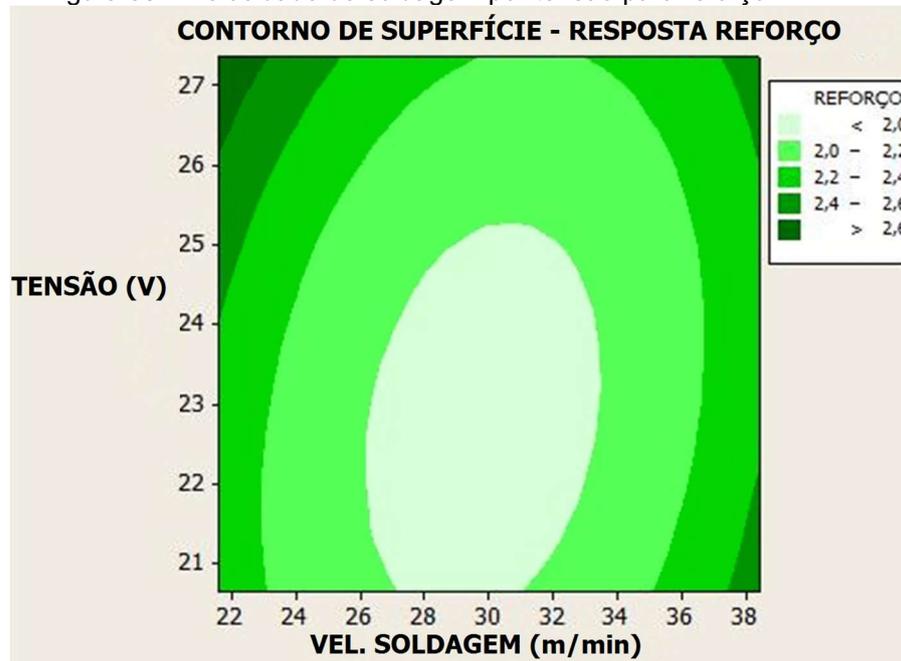
A configuração de parâmetros mais favorável a maiores larguras de cordão de solda inclui tensões acima 26V, velocidade de soldagem de 22 a 35 cm/min e velocidade de alimentação inferiores a 4,0 m/min.

4.1.2.3 Reforço

Como mencionado na seção anterior a relação entre largura e reforço é de extrema importância para o índice de convexidade, ambos estão ligados aos outros parâmetros analisados nesse trabalho visando a minimização.

Para a variável de saída de reforço, considerando o valor central do design de experimento, a velocidade de deslocamento constante de 30 cm/min, a Figura 53 ilustra a superfície de resposta e o gráfico de contorno.

Figura 53 – Velocidade de soldagem por tensão para reforço



Fonte: Autoria própria

Segundo Lima (2008) o reforço aumenta com valores de corrente maiores, ou seja, à medida que a tensão aumenta e por consequência a reduz a corrente a tendência é que os valores de reforço reduzam.

Outro fator que influencia os valores de reforço é o aumento da velocidade de soldagem, pois ao passo que a velocidade de soldagem aumente o reforço apresenta redução do seu valor (LIMA,2008).

Analisando o contorno de superfície ilustrada pela Figura 51, pode-se observar que os menores reforços para valores menores que a tensão média de 24V e velocidades de soldagem 28 a 32 cm/min.

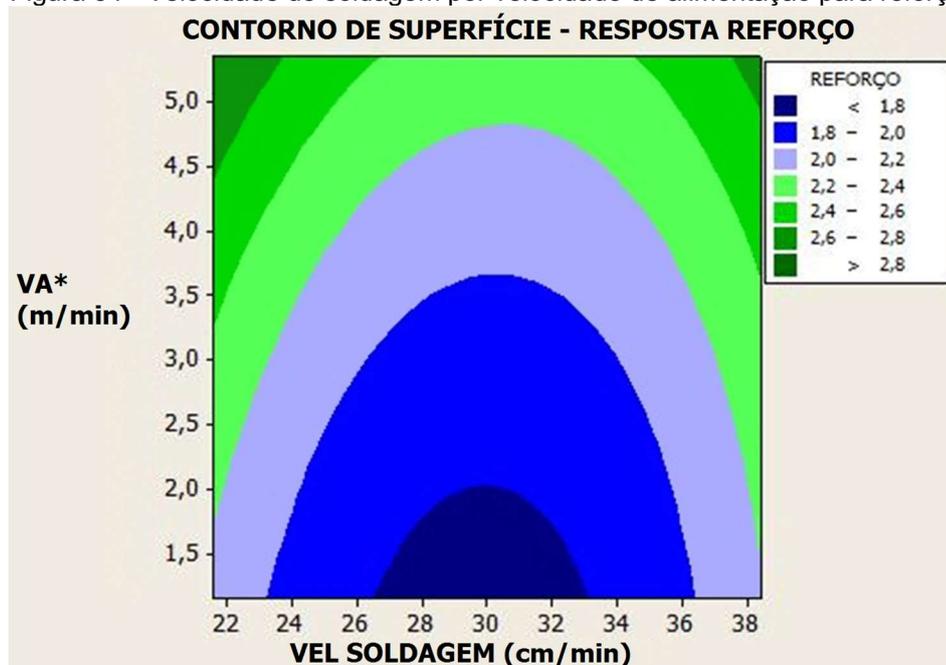
Segundo Lima (2008) a soldagem na região de curto circuito apresentou melhores valores para aplicação do revestimento duro e com menores velocidades de alimentação por proporcionar elevado rendimento, menor penetração, menor diluição do metal de solda e maior relação reforço/largura.

Esse tipo de comportamento segundo Wainer, Brandi e De Melo (1992) pode ser explicado pelo tipo de transferência atuante durante o processo de soldagem, visto que tensões próximas a 22V o modo de transferência é curto circuito.

Pode-se observar na figura 53 que na região de tensão de 22 V e velocidades de soldagem intermediárias, de 26 m/min a 33 m/min, tem-se os melhores valores de reforço, corroborando características positivas para a aplicação de revestimento duro.

A Figura 54 ilustra a superfície de resposta e o gráfico de contorno para o reforço em que a tensão assume valor de 24V.

Figura 54 - Velocidade de soldagem por velocidade de alimentação para reforço



Observando a Figura 54, para obter menores valores de reforços deve-se ter menores quantidades de metal depositado, ou seja, para menores velocidades de alimentação geram menores reforços, aplicado para uma ampla faixa de velocidades de soldagem, corroborando os autores.

Para a resposta de reforço os menores valores são possíveis para uma ampla faixa de velocidade de soldagem com valores de velocidade de alimentação inferiores a 4,5 m/min, com os melhores parâmetros na faixa de 28 cm/min à 32 cm/min com velocidade de alimentação de 1,5 m/min.

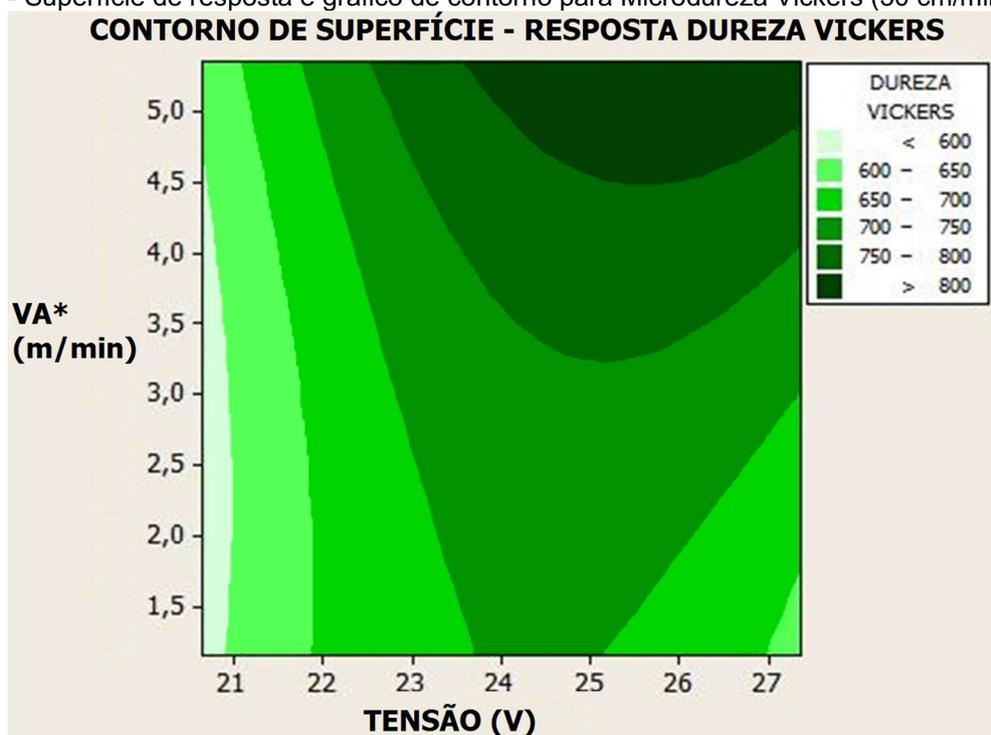
4.1.2.4 Microdureza Vickers

Segundo Leite e Marques (2009) afirmam que vários autores que o aumento de dureza pode resultar no aumento da resistência ao desgaste, porém pode haver diferenças nos valores de resistência ao desgaste dependendo do revestimento aplicado.

Leite e Marques (2009) ainda apresentam resultados de outros autores que reiteram a importância da dureza, porém o que determina a resistência ao desgaste é a microestrutura constituinte.

O contorno de superfície ilustrado pela Figura 55, considerando a velocidade de deslocamento de 30 cm/min.

Figura 55 - Superfície de resposta e gráfico de contorno para Microdureza Vickers (30 cm/min)



Fonte: Autoria própria

Segundo Gomes (2008) a diluição do revestimento é diretamente proporcional ao aporte térmico e inversamente proporcional a dureza do depósito.

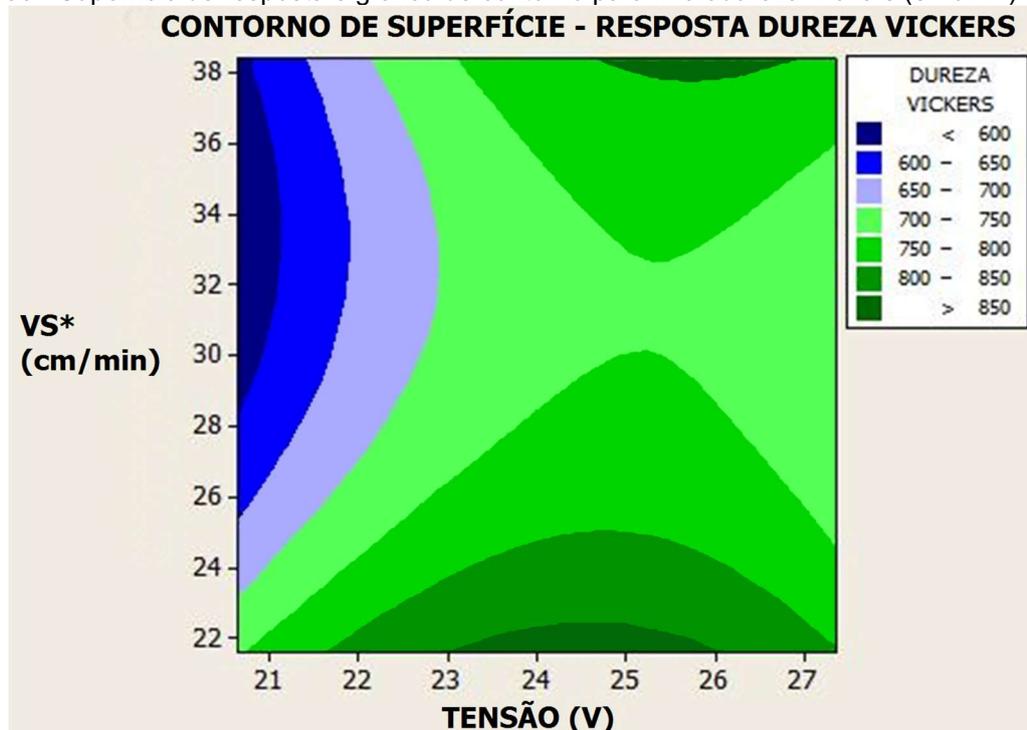
Observando o contorno de resposta para microdureza Vickers, pode-se inferir que para valores intermediários de tensão 24V à 27V e valores elevados de velocidade de alimentação a partir de 4,5 m/min obtém-se dureza elevada para os revestimentos depositados.

Esse comportamento acontece no aporte térmico, que devido a elevada velocidade de alimentação, aliada a velocidade de soldagem não produzem a energia suficiente para que a diluição aumente de forma a reduzir a dureza para a faixa analisada.

Se comparar a outras regiões observa-se que para baixas tensões e baixas velocidades de alimentação a dureza é drasticamente reduzida, pelo fato de ter maior aporte térmico de modo que a diluição seja muito maior e ocorra a introdução de carbono da matriz afetando a dureza do depósito.

Estabelecendo o parâmetro central da velocidade de alimentação do arame de 3 m/min, a superfície de resposta e o gráfico de contorno é ilustrado pela Figura 56.

Figura 56 - Superfície de resposta e gráfico de contorno para Microdureza Vickers (3 m/min)



Fonte: Autoria própria

Analisando o contorno de superfície acima pode-se observar uma área de dureza elevada que reúne baixa tensão e elevadas velocidades de soldagem, ou seja, elevado aporte térmico e elevada velocidade de deslocamento, esse conjunto de fatores não proporciona o aumento da diluição e conseqüentemente a redução da dureza.

Outro fator que cabe ser salientado é que a faixa de tensão em que os valores de maior dureza se concentram, é caracterizado pelo modo de transferência curto-circuito já caracterizado como propício para a aplicação de revestimento duro.

Os parâmetros que produzem a maior dureza no revestimento é tensão de 20 V à 22 V com velocidade de soldagem de 24 cm/min à 38 cm/min.

4.1.3 Análise da microestrutura

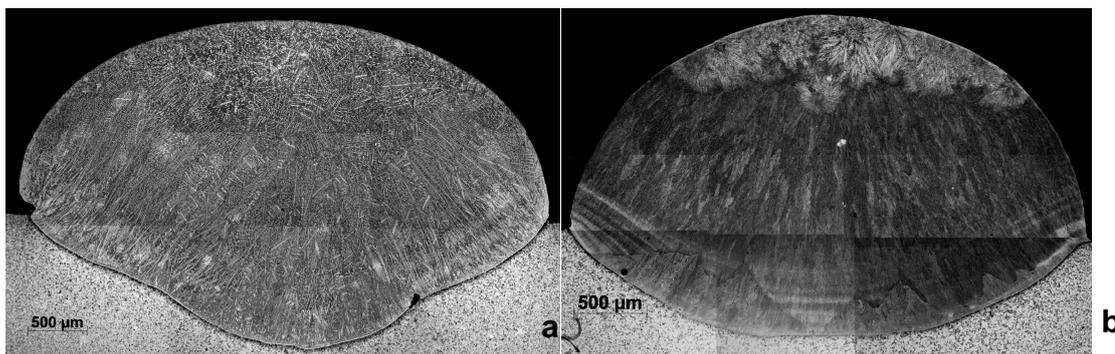
Para análise da micro estrutura buscou-se a compreensão dos mecanismos que atuam nos cordões de solda, para tanto selecionou-se as amostras que apresentaram valores de alta, média e baixa diluição.

As amostras que apresentaram maiores níveis de diluição, foram: amostra 5 com 32% e a amostra 14 com 30% de diluição. As amostras que apresentaram níveis intermediários de diluição, foram: amostra 1 com 25% e a amostra 6 com 24%. E para valores menores de diluição, foram: amostra 16 com 14% e amostra 17 com 11% de diluição.

Estabelecidos os grupos de análise, observou-se as microestruturas que constituem os cordões de solda.

A Figura 57, ilustra as micrografias das amostras 5 e 14, ambos com as maiores diluições.

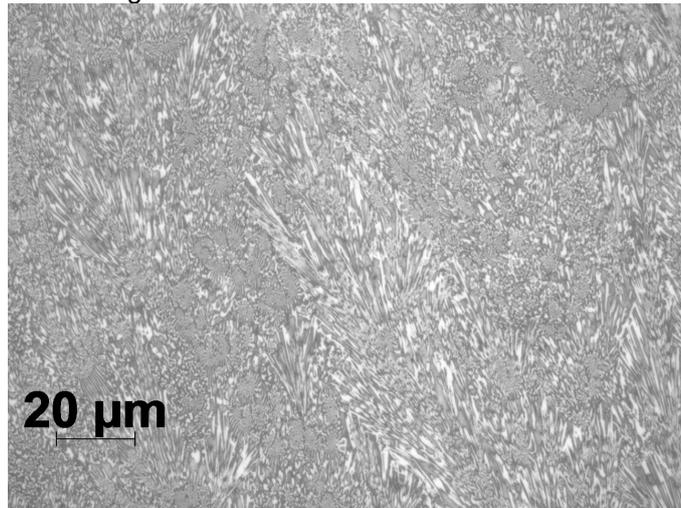
Figura 57 - (a) micrografia amostra 5; micrografia amostra 14



Fonte: Autoria própria

As duas amostras são muito semelhantes, é possível observar com clareza a divisão entre as áreas do cordão de solda, as microestruturas presentes no topo do cordão se diferem das microestruturas da zona intermediária e inferior. A região inferior central é ilustrada pela Figura 58, pode-se observar as características presentes nessas zonas.

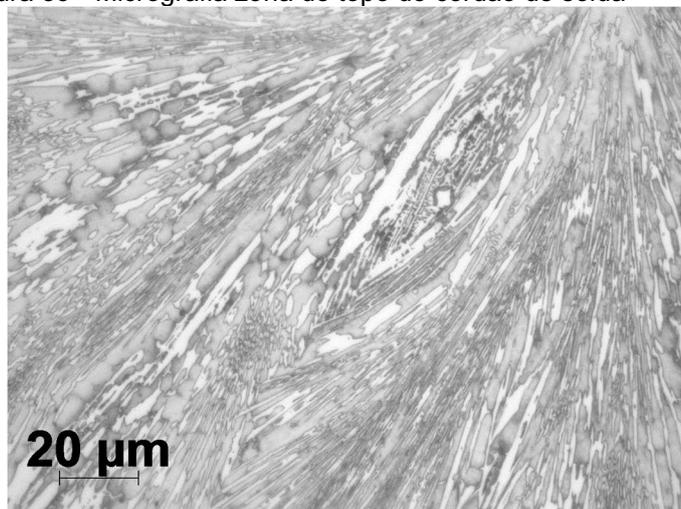
Figura 58 - Micrografia zona intermediária do cordão de solda



Fonte: Autoria própria

Essa formação é identificada como eutética, ou seja, austenita mais carboneto, em que a parte mais escura é austenita e a mais clara são os carbonetos. Não há formação de carbonetos primários em regiões inferiores e intermediárias, isso se deve ao aumento de carbono nessa região. A Figura 59 ilustra a região do topo do cordão, comum as duas amostras:

Figura 59 - Micrografia zona de topo do cordão de solda



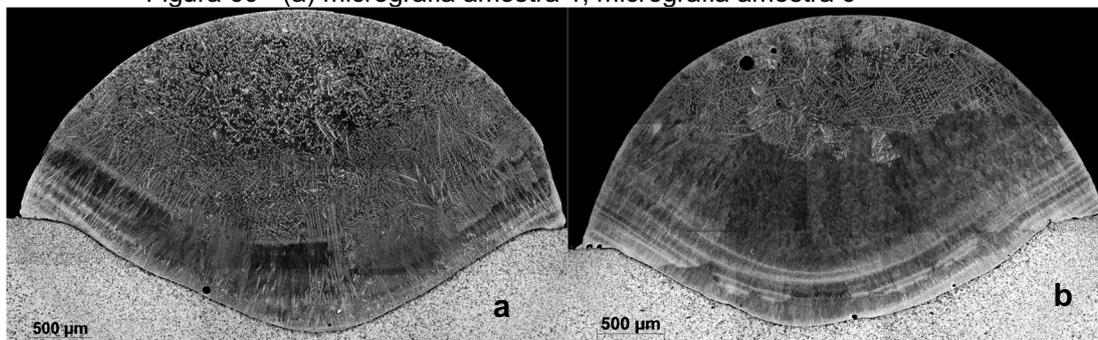
Fonte: Autoria própria

Nessa micrografia observa-se no centro a formação de carboneto primário em formato de agulha e o grande volume de microestrutura eutética é devido ao efeito da diluição (LIMA,2008).

No topo do cordão é possível observar a formação de carbonetos primários em matriz eutética, sem orientação definida. Isso se deve a baixa difusão do carbono no topo do cordão, promovendo a maior concentração de cromo para a formação de carbonetos primários.

Segundo Chang et al. (2009) a variação da concentração do carbono contribui para a alteração do formato do carboneto. Esse tipo de formação é do tipo $(Cr,Fe)_7C_3$ mantendo o formato de agulha. As amostras 1 e 6, estão inclusas no grupo de diluição intermediária e são ilustradas pela Figura 60.

Figura 60 - (a) micrografia amostra 1; micrografia amostra 6



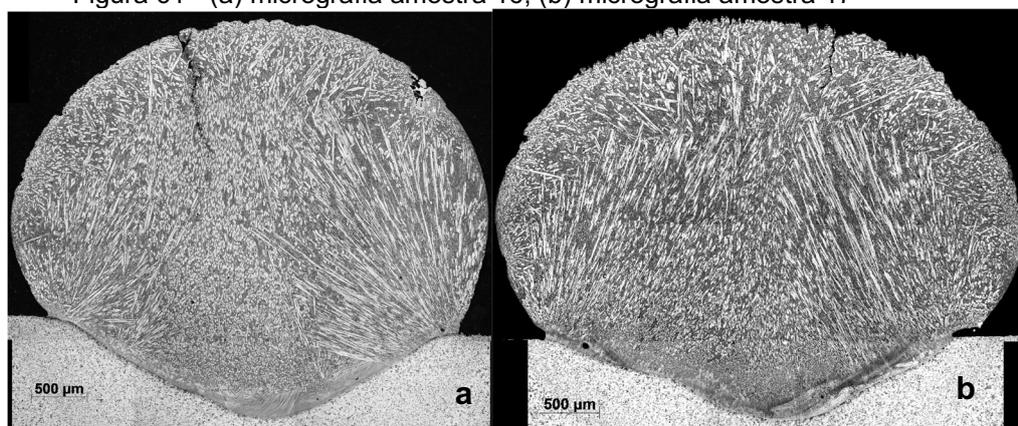
Fonte: Autoria própria

Comparando as duas amostras, nota-se a ocorrência dos dois tipos de microestruturas das amostras 5 e 14, uma microestrutura eutética e a presença de carbonetos primários do tipo $(Cr,Fe)_7C_3$.

Nota-se ainda, uma diferença muito clara na quantidade de carbonetos primários presentes nessas amostras, sendo muito maior quando compara as duas primeiras e mais distribuídas.

Avaliando as amostras 1 e 6, a primeira possui distribuição maior de carbonetos primários se comparada com a segunda. A amostra 6 apresenta uma zona intermediária do cordão com microestrutura eutética bem definida. A Figura 61 ilustra as amostras 16 e 17, que compõe o grupo das amostras com menores diluições.

Figura 61 - (a) micrografia amostra 16; (b) micrografia amostra 17



Fonte: Autoria própria

Observando as amostras torna-se evidente a diferença da microestrutura quando se compara as amostras com diluição intermediária e maior, representadas pelas amostras 1, 5, 6 e 14.

O cordão de solda apresenta dois tipos de microestrutura que predominam as regiões do revestimento, são eles: Os carbonetos primários em formato de agulha e carboneto primário no formato poligonal.

A distribuição desses carbonetos também é bem distinta, visto que na região inferior e intermediária observa-se o carboneto na forma de agulha ao passo que no topo do cordão observa-se a ocorrência de carboneto poligonal.

Avaliando os carbonetos primários, é possível perceber uma clara orientação na sua formação, onde orientam para o topo do cordão, ou seja, eles se organizam de acordo com o fluxo de calor durante a soldagem.

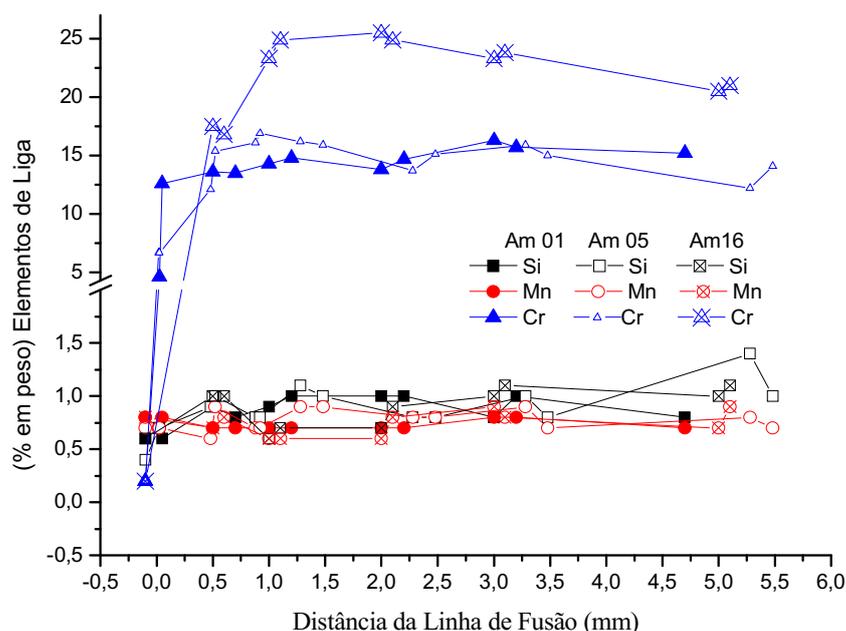
Há uma diferença entre a resistência ao deslizamento para o carboneto em forma de agulha e o poligonal, o segundo possui maior resistência se comparada ao primeiro.

4.1.4 Análise da composição química

Como continuidade do estudo das microestruturas, realizou-se a análise da composição química das amostras por meio do Microscópio Eletrônico de Varredura (MEV) e estudo aprofundado das microestruturas características.

Analisou-se a composição das amostras 1, 5 e 16, o Gráfico 2 mostra a composição química em relação a distância da linha de fusão.

Gráfico 2 - Composição química dos cordões de solda.



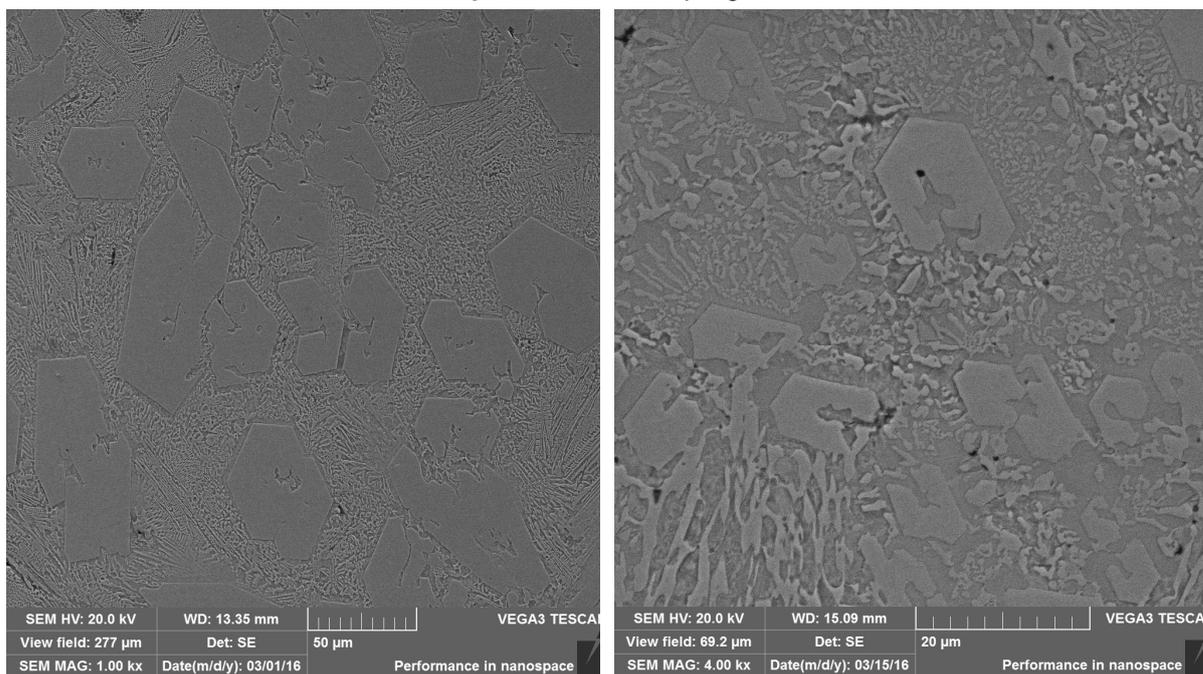
Fonte: Autoria própria

As amostras 1, 5 e 16 para elementos de liga como Silício (Si) e Manganês (Mn) apresentam quantidades aproximadas em toda a extensão do cordão de solda, tem-se variações de 0,5 e 1 % em peso de elemento de liga.

Para o elemento de liga cromo (Cr) as amostras 1 e 5 apresentam valores semelhantes em todo o cordão de solda, em torno de 12,5 a 17,5% em peso de elemento de liga. Cabe rememorar que as amostras 1 e 5 tem valores de diluição respectivamente intermediária e maior.

Analisando a amostra 16, pode-se observar a maior presença de cromo se comparado os revestimentos analisados, com 17,5 a 25% em peso de elemento de liga é muito próximo da composição nominal do arame utilizado, ou seja, a amostra que contém menor diluição e apresenta carbonetos primários e poligonal e maiores níveis de elementos de liga constituem o grupo de características favoráveis para revestimentos resistentes ao desgaste abrasivo. A Figura 62 ilustra a microestrutura característica que promove a resistência que são os carbonetos de cromo em forma poligonal na amostra 16, a região analisada é da zona central do cordão de solda.

Figura 62 - Formação de carbonetos na região central da amostra 16 (a) visão geral, (b) detalhe da formação do carboneto poligonal.



Fonte: Autoria própria

A formação de carboneto na forma poligonal se deu em regiões superiores do cordão de solda em maior quantidade, o que decorre da maior taxa de nucleação característico da região devido imposição de condições de resfriamento diferentes do cordão depositado.

5 CONCLUSÃO

Após as atividades desenvolvidas nesse estudo com aplicação do design experimental do tipo CCC (Composto Central Circunscrito) para investigar a influência da tensão, velocidade de soldagem e de alimentação do arame na deposição de uma liga de carbono, pode-se concluir aspectos muito importantes.

O desenho experimental utilizado CCC atendeu às expectativas com relação ao desenvolvimento de um estudo amplo no que se refere aos parâmetros e os níveis com um número reduzido de corpos de prova se comparado a outros modelos de experimentais.

O modelo de ajuste utilizado o MSR (Metodologia de Superfície de Resposta) com a equação de 2ª ordem e geração dos contornos de superfície de resposta torna a análise simples e rápida, pode-se ainda visualizar simultaneamente todos os fatores que se visa melhorar.

Os parâmetros que combinados apresentaram melhores geometrias são: tensão de 22 a 25V, velocidade de soldagem de 30 cm/min e um vasto conjunto de alimentação de arame de 1,15 e 4,5 m/min.

Os menores valores de diluição foram obtidos com velocidade de soldagem de no mínimo 35 cm/min, alimentação de arame de 3,0 m/min e valores de tensão inferiores a 24V.

O aumento da dureza foi obtido em amostras com menor diluição, com dureza na faixa de 900 e 1100 Hv, porém esses valores de dureza não foram verificados nos cordões que agrupam características de melhor geometria.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- ASTM E384**, Standard Test Method for Microindentation Hardnesses of Materials, ASTM International, West Conshohocken, PA, 2011.
- BARROS NETO, B.; SCARMINIO, I.S.; BRUNS, R.E. **Planejamento e otimização de experimentos**. Campinas: Editora Unicamp, 1996.
- BONANNI, C.G. **Uso combinado das técnicas doe e simulação de Monte Carlo em um processo de soldagem mig/mag pulsado**: 2005. 104p. Dissertação (Mestrado) - Curso de Engenharia de Produção, Universidade Federal de Itajuba, 2005.
- BOX, G.E.P.; HUNTER, W.G.; HUNTER, J.S. **Statistics for experimenters**. An introduction to design, data analysis and model building. Nova York: Editora Wiley, 1978.
- CHANG, C. H., LIN, C. M., HSIEH, C.C., CHEN, J.H., FAN, C.M., WU, W., Effect of carbon content on microstructural characteristics of the hypereutectic Fe–Cr–C claddings, **Materials Chemistry and Physics**, vol. 117, p. 257–261, 2009.
- CHANG C.C., CHEN L, LIN C., CHEN J., FAN C., WU W., Microstructure and wear characteristics of hypereutectic Fe– Cr– C cladding with various carbon contents, **Surface & Coatings Technology**, vol. 205, p.245–250, 2010.
- DOE.WRAPPER. Central Composite Designs: Statistical background of central composite designs. 10 fev. 2020. Disponível em: < <https://rdr.io/cran/DoE.wrapper/man/CentralCompositeDesigns.html>>. Acesso em 15 fev. 2020.
- ENGINEERING STATISTICS HANDBOOK. Central Composite Designs (CCD). 15 fev. 2020. Disponível em: < <https://www.itl.nist.gov/div898/handbook/pri/section3/pri3361.htm>>. Acesso em: 15 fev. 2020.
- ESAB (Brasil). **APOSTILA DE SOLDAGEM MIG MAG**. Disponível em: https://www.esab.com.br/br/pt/education/apostilas/upload/1901104rev0_apostilasoldagemmigmag_low.pdf. Acesso em: 08 jun. 2020.
- ESAB (Brasil). **APOSTILA DE ARAMES TUBULARES OK**. Disponível em: https://www.esab.com.br/br/pt/education/apostilas/upload/1901098rev1_apostilaaramestubulares_ok.pdf. Acesso em: 08 jun. 2020.
- FELIPE, GABRIELI BORGES UGIONI. **Estudo da resistência à abrasão e erosão do aço ASTM A106GrB submetido a diferentes condições de tempo e temperaturas de esferoidização**. 2017. 125 p. Dissertação (Mestrado) - Universidade do Extremo Sul Catarinense, Programa de Pós-Graduação em Ciência e Engenharia de Materiais, Criciúma, 2017

LEITE, R. V. DE MELO, MARQUES, P. V. Estudo Comparativo da Resistência ao Desgaste Abrasivo do Revestimento de Três Ligas Metálicas Utilizadas na Indústria, Aplicadas por Soldagem com Arames Tubulares, **Soldagem & Inspeção**, vol.14, nº4, p.329-335, 2009.

LIMA, A. C., FERRARESI V. A., Análise da Microestrutura e da resistência ao desgaste de revestimento duro utilizado pela indústria sucro-alcooleira, **Soldagem & Inspeção**, vol. 14, nº2, p.140-150, 2009.

LIMA, A. C.; SIQUEIRA, I. L.; MORAIS, L. I.; OLIVEIRA, F. P.; NETO, V. P. M. Soldagem de Revestimentos Duros em Facas Picadoras de Cana-de-Açúcar de Indústria Sucroalcooleira: Eletrodo Revestido 'Versus Arame Tubular. In: CONNEPI – CONGRESSO NORTE NORDESTE DE PESQUISA E INOVAÇÃO, 2012, Palmas - TO. VII CONNEPI. Palmas - TO: CONNEPI, 2012. v. 1.

MACEDO, B. P. N.; TREVISAN, L. A.; CRESPO, G. S.; MANERA, R. DA S.; VENTRELLA, V. A.; GALLEGO, J. Revestimentos Duros Depositados por Soldagem: O Papel dos Carbonetos sobre a Resistência ao Desgaste Abrasivo. In: XXXVI CONSOLDA – CONGRESSO NACIONAL DE SOLDAGEM, 2010, Recife / PE. **Anais do Congresso Nacional de Soldagem - Associação Brasileira de Soldagem. São Paulo: Associação Brasileira de Soldagem, 2010.**

MARQUES, Paulo Villani; MODENESI, Paulo José; BRACARENSE, Alexandre Queiroz. **Soldagem Fundamentos e Tecnologia**. 3.ed. Belo Horizonte: Editora UFMG, 2011.362.

MATTIETTO, R. A.; MATTA, V. M. Utilização de um delineamento composto central rotacional para avaliação microbiológica de polpas de açaí pasteurizadas. In: XIX CONGRESSO BRASILEIRO DE ENGENHARIA QUÍMICA, 2012, Búzios.

MONTGOMERY, D. C. **Design and Analysis of Experiments**. 6th ed., New York: Wiley, 2005.

MONTGOMERY, D. C. **Introdução ao controle estatístico da qualidade**. 7th ed., New York: LTC, 2017.

SILVA, et al. A quality and cost approach for welding process selection, Journal of the Braz.Soc. **Mechanical Sciences**, v. 22, n. 3, p. 389-398, 2000.

SOUZA, M. T. S.; FERNANDES, M. M.; MIRANDA, R. C. Otimização dos parâmetros de soldagem a ponto por resistência em uma indústria automotiva por meio da análise de experimentos e metodologia de superfície de resposta. **Ciência & Engenharia**, v. 22, p. 131-140, 2013.

STATISTICS TOOLBOX. Central Composite Designs. 10 fev. 2020. Disponível em: <<http://www.ece.northwestern.edu/local-apps/matlabhelp/toolbox/stats/doe5.html>>. Acesso em: 15 fev. 2020.

SOUZA, D. D. **Aplicação de revestimento duro utilizando o processo FCAW duplo arame para diferentes tipos de consumíveis**. 2015. 116f. Dissertação (Mestrado) – Programa de Pós-Graduação em Engenharia Mecânica, Universidade Federal de Uberlândia. Uberlândia, 2015.

WAINER, E.; BRANDI, S.D.; DE MELO, F.D.H. **Soldagem: Processo e Metalurgia**. Editora Blucher, 494p.1992.