



UNIVERSIDADE FEDERAL DA PARAÍBA
CENTRO DE TECNOLOGIA
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA MECÂNICA
MESTRADO – DOUTORADO

**INFLUÊNCIA DA ENERGIA DE SOLDAGEM E DO TECIMENTO
SOBRE A GEOMETRIA DO CORDÃO DE SOLDA NA SOLDAGEM
DE REVESTIMENTO**

Por

PAULO RICARDO DE OLIVEIRA QUEIROZ

*Dissertação de Mestrado apresentada à Universidade Federal da Paraíba para
obtenção do grau de Mestre.*

PAULO RICARDO DE OLIVEIRA QUEIROZ

**INFLUÊNCIA DA ENERGIA DE SOLDAGEM E DO TECIMENTO
SOBRE A GEOMETRIA DO CORDÃO DE SOLDA NA SOLDAGEM
DE REVESTIMENTO**

Dissertação apresentada ao
curso de Pós-Graduação em
engenharia mecânica da
Universidade Federal da
Paraíba, em cumprimento às
exigências para obtenção do
Grau de Mestre.

Orientador: Professor Josinaldo Pereira Leite

INFLUÊNCIA DA ENERGIA DE SOLDAGEM E DO TECIMENTO SOBRE A GEOMETRIA DO CORDÃO DE SOLDA NA SOLDAGEM DE REVESTIMENTO

por

PAULO RICARDO DE OLIVEIRA QUEIROZ

Dissertação aprovada em 29 de julho de 2021



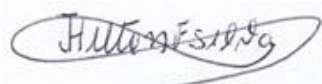
Prof. Dr. JOSINALDO PEREIRA LEITE

Orientador – UFPB



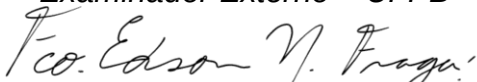
Profa. Dra. KELLY CRISTIANE GOMES DA SILVA

Examinadora Interna – UFPB



Prof. Dr. JOSÉ HILTON FERREIRA DA SILVA

Examinador Externo – UFPB



Prof. Dr. FRANCISCO EDSON NOGUEIRA FRAGA

Examinador Externo – UFERSA

Catálogo na publicação
Seção de Catalogação e Classificação

Q3i Queiroz, Paulo Ricardo de Oliveira.
 Influência da energia de soldagem e do tectimento sobre
 a geometria do cordão de solda na soldagem de
 revestimento / Paulo Ricardo de Oliveira Queiroz. -
 João Pessoa, 2021.
 89 f. : il.

 Orientação: Josinaldo Pereira Leite.
 Dissertação (Mestrado) - UFPB/Tecnologia.

 1. Soldagem - revestimento. 2. Geometria. 3. FCAW-G. I.
 Leite, Josinaldo Pereira. II. Título.

UFPB/BC

CDU 621.791(043)

DEDICATÓRIA

Dedico este trabalho aos meus pais Paulo Queiroz e Alcineide Fonseca, pelo incentivo e apoio incondicional, durante o curso. Dedico também à minha noiva Renata, pela compreensão, companheirismo e carinho. Também dedico esta conquista ao meu irmão, um dos maiores incentivadores da pesquisa e minha maior referência de ser humano. E por último, dedico de coração partido a minha Avó, Maria Salete, in memória, ela que sempre orava por mim nas minhas viagens entre Mossoró e João Pessoa.

AGRADECIMENTOS

Ao meus pais pelo grande incentivo e suporte.

Ao meu co-orientador, professor José Hilton, pela paciência, conhecimento e dedicação com a pesquisa, ao professor orientador Josinaldo Pereira Leite pela competência e dedicação ao ofício do ensino;

Ao professor Alan Silva, coordenador do curso de soldagem do IFCE/Tabuleiro do norte, por ter me auxiliado na pesquisa e ter cedido os laboratórios em período de pandemia. Aos técnicos de laboratórios do IFCE/Tabuleiro, por me ajudar de forma operacional na pesquisa e a todos que de algum modo contribuíram para este trabalho.

INFLUÊNCIA DA ENERGIA DE SOLDAGEM E DO TECIMENTO SOBRE A GEOMETRIA DO CORDÃO DE SOLDA NA SOLDAGEM DE REVESTIMENTO

RESUMO

A soldagem de revestimento de aços carbono com aços inoxidáveis tem ganhado destaque no meio industrial nos últimos anos por permitir que superfícies com propriedades anti-corrosivas sejam obtidas a partir de materiais de baixo custo, como os aços carbono ou aços de baixa liga. No entanto, visando garantir a qualidade final dos revestimentos, é importante que o procedimento de soldagem empregado seja bem ajustado, para que os cordões sejam depositados com a geometria desejada e ocorrência nula de defeitos. Este trabalho tem como objetivo avaliar o comportamento geométrico de cordões de solda em soldagem de revestimento para diferentes níveis de energia de soldagem e tipos de tecimento do arco elétrico. O processo de soldagem FCAW foi utilizado com arame tubular *flux-cored* MIX 38LFC com diâmetro 1,2 mm; foram realizadas soldagem em simples deposição sobre chapas de aço ABNT 1020. A energia de soldagem em quatro níveis, o tecimento do arco em quatro níveis e a polaridade do arco foram usados como variáveis de influência. Como variáveis de resposta foram analisadas: largura, penetração, reforço, diluição dos cordões de solda, extensão da ZTA e o índice de convexidade. Os resultados mostram que maiores larguras, reforços e ZTAs para cordões de soldas de revestimentos podem ser obtidos aumentando a energia de soldagem, porém esse fator não é dominante quando se trabalha com diferentes tecimentos. Da mesma forma acontece com a diluição, onde menores percentuais são alcançados com baixa energia de soldagem. Entretanto, para movimentos de tecimentos, onde a tocha exerce um papel fundamental nas laterais do cordão de solda, a diluição pode ser reduzida com maiores valores de energia. Por outro lado, reduzindo-se a energia de soldagem consegue-se obter valores reduzidos para a penetração e índice de convexidade.

Palavras-chave: Revestimento, geometria, soldagem, FCAW-G

INFLUENCE OF WELDING ENERGY AND WEAVING ON WELDING BELT GEOMETRY ON COATING WELDING

ABSTRACT

The welding of coating of carbon steels with stainless steels has gained prominence in the industrial environment in recent years for allowing surfaces with anti-corrosive properties to be obtained from low-cost materials, such as carbon steels or low-alloy steels. However, in order to ensure the final quality of the coatings, it is important that the welding procedure used is well adjusted, so that the beads are deposited with the desired geometry and zero defects. This work aims to evaluate the geometric behavior of weld beads in cladding welding for different welding energy levels and types of electric arc weaving. The FCAW welding process was used with flux-cored tubular wire MIX 38LFC with a diameter of 1.2 mm; welding was carried out in simple deposition on ABNT 1020 steel sheets. The welding energy at four levels, the weave of the arc at four levels and the polarity of the arc were used as influencing variables. As response variables were analyzed: width, penetration, reinforcement, weld bead dilution, ZTA extension and convexity index. The results show that larger widths, reinforcements and ZTAs for coating weld beads can be obtained by increasing the welding energy, but this factor is not dominant when working with different weaves. The same happens with dilution, where lower percentages are achieved with low welding energy. However, for weaving movements, where the torch plays a key role on the sides of the weld bead, the dilution can be reduced with higher energy values. On the other hand, by reducing the welding energy, it is possible to obtain reduced values for penetration and convexity index.

Keywords: Coating, geometry, welding, FCAW-G

SUMÁRIO

CAPITULO I	1
1. INTRODUÇÃO	1
2. OBJETIVOS	4
3. ESTRUTURA DO TRABALHO	5
CAPITULO II	6
4. FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA	6
4.1. PROCESSOS DE SOLDAGEM COM ARAME TUBULAR	6
4.1.1. ARAMES TUBULARES	8
4.2. SOLDAGEM DE REVESTIMENTO	10
4.2.1. CARACTERÍSTICAS DO PROCESSO CLADDING	14
4.2.2. SOLDAGEM DE REVESTIMENTO INOXIDÁVEL EM AÇOS CARBONO	15
4.2.3. CARACTERÍSTICAS GEOMÉTRICAS E OPERACIONAIS PARA A SOLDAGEM DE REVESTIMENTO	16
4.2.3.1. DILUIÇÃO	16
4.2.3.2. MOVIMENTO DE TECIMENTO	19
4.2.4. INFLUÊNCIA DA POLARIDADE EM REVESTIMENTOS	21
4.3. VARIÁVEIS ELÉTRICAS E OPERACIONAIS DO PROCESSO DE SOLDAGEM	24
4.4. CONSIDERAÇÕES FINAIS	28
CAPÍTULO III	30
5. PROCEDIMENTO EXPERIMENTAL	30
5.1. PROPOSTA	30
5.2. SELEÇÃO DO MATERIAL	31
5.3. EQUIPAMENTOS DE SOLDAGEM	31
5.4. METAL DE ADIÇÃO	35
5.5. GÁS DE PROTEÇÃO	36
5.6. SELEÇÃO DOS PARÂMETROS DE SOLDAGEM	37
5.7. EXECUÇÃO DOS ENSAIOS	38
5.8. POLARIDADE	39
5.9. METODOLOGIA PARA TRATAMENTO DOS DADOS	40

5.11. METODOLOGIA PARA ANÁLISE GEOMÉTRICA DOS CORDÕES DE SOLDA	43
5.11.1. PROCESSO DE MEDIÇÃO DA GEOMETRIA DO CORDÃO DE SOLDA	44
CAPITULO IV	47
6. RESULTADOS E DISCUSSÕES	47
6.1. EFEITO DA VARIAÇÃO DA POLARIDADE	47
6.2. PARÂMETROS GEOMÉTRICOS E DILUIÇÃO DOS CORDÕES DE SOLDA	48
6.4. ANÁLISE GEOMÉTRICA DA LARGURA CORDÕES DE SOLDA	51
6.4.1. ANÁLISE GEOMÉTRICA DA PENETRAÇÃO DOS CORDÕES DE SOLDA	53
6.4.2. ANÁLISE GEOMÉTRICA DO REFORÇO DOS CORDÕES DE SOLDA	54
6.4.3. ANÁLISE GEOMÉTRICA DA DILUIÇÃO DOS CORDÕES DE SOLDA	55
6.4.4. ANÁLISE DIMENSIONAL DA ZTA	56
6.5. ANÁLISE DO ÍNDICE DE CONVEXIDADE DOS CORDÕES DE SOLDA	57
6.6. ANÁLISE DOS EFEITOS DAS INTERAÇÕES ENTRE OS PARÂMETROS	58
6.6.1. EFEITOS DAS INTERAÇÕES SOBRE A GEOMETRIA, PRODUTIVIDADE E QUALIDADE DOS CORDÃO DE REVESTIMENTO	58
CAPITULO V	67
7. CONCLUSÕES	67
8. RECOMENDAÇÕES PARA TRABALHOS FUTUROS	69
9. REFERÊNCIAS	70

LISTA DE FIGURAS

Figura 2.1- Esquema ilustrativo da soldagem com arame tubular com proteção adicional de gás.....	06
Figura 2.2- Esquema ilustrativo da soldagem com arame tubular autoprottegido.....	07
Figura 2.3- Algumas formas de seção transversal dos arames tubulares.....	09
Figura 2.4- Princípio de operação da soldagem de revestimento.....	11
Figura 2.5- Exemplos de camadas de revestimento depositadas a partir de processos de soldagem.....	12
Figura 2.6- Desenho da geometria do cordão: soldagem de penetração (a) e soldagem de revestimento (b).....	14
Figura 2.7- Geometria desejada para a deposição de três cordões de revestimento com uma sobreposição de 40%.....	14
Figura 2.8- Aumento da difusão entre os elementos do metal base e do metal de adição em função do aumento do nível de diluição.....	17
Figura 2.9- Desenho ilustrando a trajetória descrita para cada tipo de tecimento.....	19
Figura 2.10- Comportamento do arco em CCEP e CCEN.....	22
Figura 2.11- Nomenclatura dos elementos para Soldagem a arco elétrico no processo MIG/MAG e arame tubular.....	25
Figura 3.1- fluxograma para a metodologia experimental.....	30
Figura 3.2- Célula de soldagem automatizada.....	31
Figura 3.3- fluxograma para seleção do processo MIG-N.....	32
Figura 3.4- Trator auto wave de oscilação automática.....	33
Figura 3.5- Sistema SAP 4.01 de aquisição de dados de soldagem.....	33
Figura 3.6- Diagrama conexão fonte soldagem e sistema de aquisição/ Pannel de conexões da maleta do sistema SAP V4.....	34
Figura 3.7- Representação dos corpos de provas recortados para a execução dos cordões de solda.....	37
Figura 3.8- Esquema ilustrativo dos tecimentos aplicados no estudo.....	38

Figura 3.9- Representação do procedimento experimental para o processo de análise geométrica.....	41
Figura 3.10- Lixadeira politriz.....	42
Figura 3.11- Ensaio macrográfico sem movimento de tecimento para 4 energias distintas.....	42
Figura 3.12- Ensaio macrográfico com tecimento triangular para 4 energias distintas.....	43
Figura 3.13- Ensaio macrográfico com tecimento trapezoidal para 4 energias distintas.....	43
Figura 3.14- Ensaio macrográfico com tecimento zig-zag para 4 energias distintas.....	43
Figura 3.15- Representação da área da seção transversal do cordão de solda.....	44
Figura 3.16- Seção transversal do cordão de solda.....	44
Figura 3.17- Exemplo ilustrativo da medição do reforço do cordão de solda.....	45
Figura 4.1- Cordões de solda com polaridade inversa (CC ⁺).....	47
Figura 4.2- Cordões de solda com Polaridade direta (CC-)......	47
Figura 4.3- Cordões de solda de simples deposição para as condições 01 e 02.....	49
Figura 4.4- Cordões de solda de simples deposição para as condições 03 e 04.....	50
Figura 4.5- Largura dos cordões de solda.....	51
Figura 4.6- Penetração dos cordões de solda.....	52
Figura 4.7- Reforço dos cordões de solda.....	53
Figura 4.8- Diluição dos cordões de solda.....	55
Figura 4.9- Área da ZTA.....	56
Figura 4.10- Índice de convexidade.....	57
Figura 4.11. a- Gráficos de superfícies para o movimento de tecimento linear.....	59
Figura 4.11. b- Gráficos de superfícies para o movimento de tecimento linear.....	60
Figura 4.12. a- Gráficos de superfícies para o movimento de tecimento Trapezoidal.....	62
Figura 4.12.b- Gráficos de superfícies para o movimento de tecimento Trapezoidal.....	63
Figura 4.13. a- Gráficos de superfícies para o movimento de tecimento Triangular.....	65
Figura 4.13 b- Gráficos de superfícies para o movimento de tecimento Triangular.....	66

Figura 4.14. a- Gráficos de superfícies para o movimento de tecimento Zig-Zag.....68

Figura 4.14. b- Gráficos de superfícies para o movimento de tecimento Zig-Zag.....69

LISTA DE TABELAS

Tabela 2.1 Variáveis de soldagem e descrição.....	24
Tabela 3.1- Composição química e propriedades do aço inoxidável SAE 1020.....	30
Tabela 3.2 - Dados Técnicos Fonte Eletrônica Transistorizada DigiPlus A7.....	31
Tabela 3.3- Composição química e propriedades mecânicas do arame tubular.....	35
Tabela 3.4- Parâmetros fixos e variáveis para os experimentos de simples deposição.....	36
Tabela 3.5- Delineamento experimental.....	39
Tabela 4.1 - Geometria dos cordões de solda e ZTA para cada condição analisada.....	49

LISTA DE SÍMBOLOS

A - Alongamento

A - Amperes

Ad- Área de reforço

Ad+Af- Área total

Af - Área de penetração

AISI- American Iron and Steel Institute

ANOVA- Análise de variância

Área ZTA- Área da zona termicamente afetada pelo calor

ASM- American Society of Materials

ASTM- American Society for Testing and Materials

AWS- Welding Society

CC- Corrente contínua – Polo positivo

CC+ Corrente contínua- Polo negativo

CCEN- Corrente contínua- Polo negativo

CCEP- Corrente contínua – Polo positivo

CP- Corpo de Prova

D- Diluição

DBCP- Distância do bico de contato peça

DOE- Design of Experiments

E- Energia de Soldagem

ER- Eletrodo revestido

F- fisher

FCAW- Flux Cored Arc Welding

GI- Grau de liberdade

GMAW- Gas Metal Arc Welding

HB- Dureza Brinel

i – Corrente elétrica

IC- Índice de convexidade

J- Joule

L – Comprimento do metal de adição consumido (m)

L- Largura

L ZTA- Largura da zona termicamente afetada pelo calor

LE- Limite de Escoamento

LRT- Limite de resistência a tração

MAG- metal active gas

Mc- Massa do arame consumida

Mf- Massa final da junta depois da soldagem (g)

Mi- Massa inicial da junta antes da soldagem (g)

MIG- metal inert gas

MQ- Média dos quadrados

MQi- Média dos quadrados das interações

Over-lap- Soldagem de revestimento

P- Penetração

P ZTA- Penetração da zona termicamente afetada pelo calor

q- valor crítico da amplitude Studentizada

r- o número de repetições para cada combinação

R- Reforço

Rend- Rendimento

SAE- Society of Automotive Engineers

SQ- Soma dos quadrados

Stick-Out- Distância do bico de contato peça

T - Tempo de soldagem (s)

t- Tensão elétrica

TD- Taxa de deposição

TF- Taxa de fusão

TIG- Tungsten Inert Gas

Ur- Tensão de referência

Va- Velocidade de Alimentação

Vs- Velocidade de soldagem

ZAC- Zona termicamente afetada pelo calor

ZTA- Zona termicamente afetada pelo calor

α - Nível de significância

μm - Micrômetro

ρ_a - Densidade linear do arame (g/m)

CAPITULO I

1. INTRODUÇÃO

Soldagem é o principal processo empregado para a união permanente de peças metálicas, possibilitando a montagem de conjuntos com rapidez, segurança e economia de material. Entretanto, apesar de ser considerada classicamente como um processo de união, verifica-se que nos últimos anos vários processos de soldagem vêm sendo utilizados para a deposição de material sobre uma determinada superfície com a finalidade de recuperar peças desgastadas ou para a formação de um revestimento com características especiais. Tal aplicação caracteriza o que chamamos de soldagem de revestimento.

A soldagem de revestimento é o processo em que uma camada de metal de adição é depositada sobre a superfície de outro material com o objetivo de obter propriedades ou dimensões desejadas. É comumente empregada para prorrogar a vida útil de peças que não possuem todas as propriedades necessárias para uma dada aplicação, para recuperação de elementos afetados pelo desgaste ou corrosão ou para criação de superfícies com características especiais (SOUZA, 2016). Este método de soldagem tem assumido uma importância cada vez maior, por realizar reconstituições de peças avariadas e deposições de camadas protetoras com baixo custo operacional, e por propiciar a redução do tempo de parada não programada. Logo se apresenta como uma solução prática e viável, devido às grandes vantagens e flexibilidade desta técnica.

Kannan e Murugan (2006) assegura que a aplicação da soldagem de revestimento para a criação de superfícies com características especiais tem aumentado no ambiente industrial e, considerando os diversos tipos de materiais para revestimentos, os aços inoxidáveis se caracterizam como uma das aplicações mais frequentes.

Os aços inoxidáveis são geralmente depositados sobre superfícies de aços carbono ou aços de baixa liga, produzindo uma camada com propriedades anti-corrosivas e de resistência necessárias para suportar ambientes sujeitos ao alto desgaste por corrosão. Os resultados deste processo têm tornado essa aplicação bastante atrativa, na medida em que superfícies resistentes a ambientes corrosivos podem ser produzidas a partir de materiais

comuns e de menor custo, em comparação ao emprego de componentes puramente de aços inoxidáveis, os quais apresentam custos elevados. Portanto, as aplicações da soldagem de revestimento de aços carbono com aços inoxidáveis se estendem entre os mais diversos tipos de indústrias, como as petrolíferas, químicas, alimentícias, agrícolas, nucleares, navais, ferroviária, de construção civil, entre várias outras (PALANI, 2006).

Segundo Palani (2007), diferentemente das aplicações convencionais, em que é desejável alta penetração (P) para garantir a resistência da junta soldada, na soldagem de revestimento o perfil geométrico desejado se resume a grandes larguras do cordão (W), altos reforços (R), baixas penetrações (P) e baixos percentuais de diluição (D). A obtenção deste contorno geométrico característico é significativa para que a técnica de revestimento permita recobrir a maior área possível com o menor número de passes, resultando em economias consideráveis de materiais e tempo.

Outro aspecto de grande importância para o processo de revestimento é o controle da diluição. Este controle, segundo vários pesquisadores, é uma das principais características para assegurar a qualidade final dos revestimentos (KANNAN; MURUGAN, 2006). Shahi e Pandey (2008) argumentam que a composição e as propriedades dos componentes revestidos são fortemente influenciadas pela diluição. Para o processo de revestimento de aços carbono com aços inoxidáveis, o acréscimo da diluição reduz os elementos de liga e aumenta o conteúdo de carbono na camada revestida, reduzindo as propriedades de resistência à corrosão além de causar outros problemas metalúrgicos. Portanto, o estudo e a evolução dos procedimentos capazes de oferecer uma diluição ótima tem se tornado muito importante.

Dentre os processos de soldagem que podem ser empregados para operações de revestimento de aços carbono com aços inoxidáveis, destaca-se a soldagem com arame tubular. De acordo com Jeffus (2004 Apud Gomes, 2010), esse processo tem apresentado algumas vantagens condizentes com as atuais necessidades industriais no que diz respeito à obtenção de processos produtivos e econômicos. Entre essas vantagens, destacam-se a deposição de materiais com altas taxas de produção, excelente controle da poça de fusão e mínimo desperdício de eletrodo.

Embora apresente vantagens produtivas e econômicas, a soldagem com arame tubular para o revestimento de aços carbono com aços inoxidáveis se qualifica como uma atividade criteriosa. A soldagem é um processo que apresenta vários parâmetros de entrada e múltiplas variáveis de resposta, o que faz com que o adequado controle do processo seja

fundamental para o alcance da qualidade desejada do cordão de solda. Dessa forma, é importante destacar que todo esse modelo de seleção não inibem a manifestação de defeitos, uma vez que para minimizar esses problemas é necessário selecionar o material corretamente e manter o controle dos parâmetros de soldagens.

2. OBJETIVOS

Objetivo Geral

Conforme os termos abordados na introdução, a proposta principal dessa dissertação é obter uma análise detalhada dos parâmetros elétricos e operacionais para procedimentos de soldagem com arame tubular (FCAW) aplicados para revestimento de superfícies metálicas.

Para concluir o objetivo principal, propõem-se como objetivos intermediários os tópicos mencionados a seguir:

Objetivos Específicos

- Avaliar a influência da energia de soldagem sobre a geometria e índice de convexidade dos cordões de solda.
- Investigar a influência do tipo de tecimento sobre as características geométricas dos cordões de solda.
- Analisar através de ensaios macográficos a influência da energia de soldagem e do tipo de tecimento sobre a extensão da Zona Termicamente Afetada pelo Calor (ZAC).
- Avaliar o efeito da polaridade do arco sobre a qualidade dos cordões de solda.

3. ESTRUTURA DO TRABALHO

Com o objetivo de auxiliar na compreensão da ordem e estrutura organizacional do trabalho, a presente pesquisa foi fragmentada em 5 capítulos, tratando-se dos seguintes assuntos:

Capítulo II - Introdução.

Este capítulo introduz de forma breve a problemática da pesquisa, relatando sua importância e seus objetivos para desenvolver o estudo.

Capítulo III – Revisão Bibliográfica.

No capítulo 3, abordou-se uma revisão bibliográfica sobre o conteúdo da pesquisa, onde inicialmente destacou-se as características dos processos de soldagem com arame tubular (FCAW) com corrente contínua e logo após, abordou-se o comportamento dos cordões de soldas em função de suas propriedades geométricas e produtivas em chapas de aço SAE 1020.

Capítulo IV – Procedimento Experimental.

O tópico 4 descreve com detalhe os procedimentos, materiais e equipamentos utilizados para desenvolver a pesquisa, bem como sua forma de utilização diante dos resultados.

Capítulo V – Resultados e Discussões.

No capítulo 5 são apresentados os resultados obtidos dos experimentos, além das discussões acerca destes. Nesta etapa encontra-se a análise gráfica e descritiva das variáveis de estudo em função das características geométricas e qualitativas dos cordões de solda.

Capítulo VI – Conclusões, Referências e Sugestões para Trabalhos Futuros.

O capítulo 6 apresenta as conclusões dos resultados do trabalho, sugestões para trabalhos futuros e as referências.

CAPITULO II

4. FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA

4.1. PROCESSOS DE SOLDAGEM COM ARAME TUBULAR

O Processo de soldagem com arame tubular (FCAW – *Flux Cored Arc Welding*) é um processo de soldagem por fusão, cujo arco é estabelecido entre a peça e um arame-eletrodo alimentado continuamente, sendo protegido pela ação de um gás externo (ou não) e pela decomposição do fluxo alojado no interior do arame. Este fluxo é composto por materiais inorgânicos e metálicos que possuem várias funções, dentre as quais, a melhoria das características do arco elétrico e da transferência do metal de solda, a proteção do banho de fusão e, em alguns casos, a adição de elementos de liga, além de atuar como formador de escória (BRACARENSE,2009).

Existem duas variantes do processo; uma com proteção adicional de gás FCAW-G, Figura 2.1. E a outra, sem a proteção externa de gás ou autoprotegido FCAW-S, Figura 2.2. Na soldagem com arame tubular autoprotegido o metal fundido é protegido por uma camada de escória, pelos gases e pelos elementos desoxidantes/desnitretantes resultantes da decomposição do fluxo.

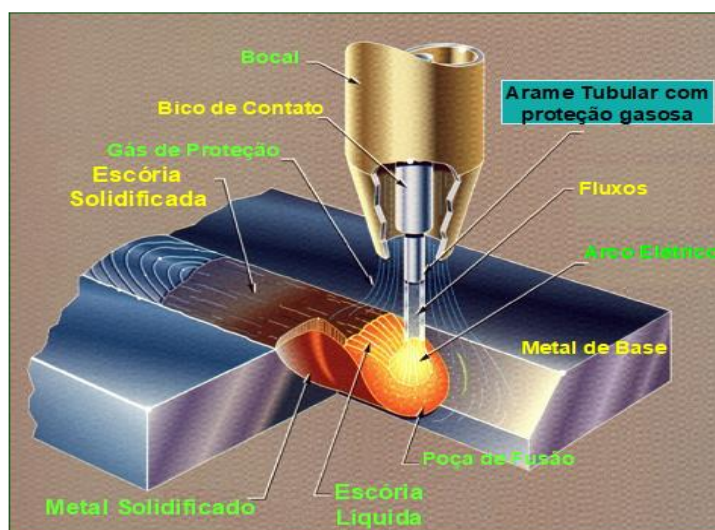


Figura 2.1- Esquema ilustrativo da soldagem com arame tubular com proteção adicional de gás (SILVA, 2005)

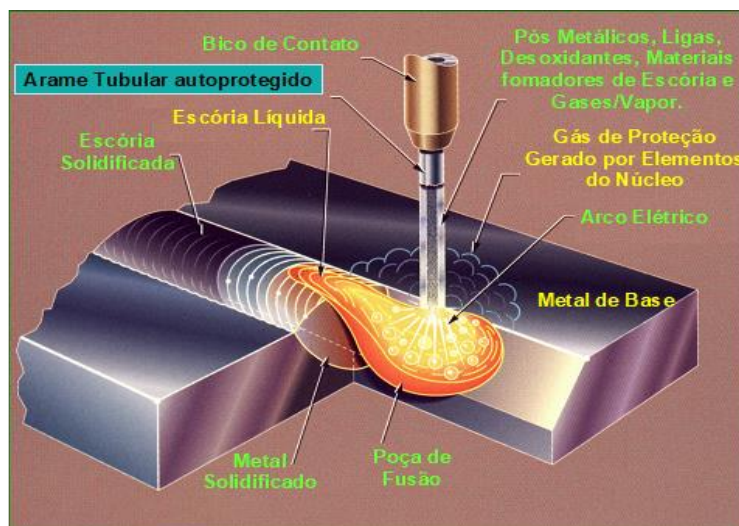


Figura 2.2-Esquema ilustrativo da soldagem com arame tubular autoprotegido (SILVA, 2005).

Apesar da similaridade entre os processos de eletrodo tubular com proteção gasosa e MAG, este manifesta algumas vantagens e limitações em relação aos processos tradicionais. Assim sendo o processo arame tubular se realça por apresentar metal depositado de alta qualidade e solda com boa aparência visual, além de soldar vários tipos de aços e em grandes faixas de espessuras, apresenta alta taxa de deposição devido à alta densidade de corrente, apresenta alta tolerância com relação a contaminantes que podem originar trincas, possui relativamente alta eficiência de deposição e alta produtividade (ARAÚJO, 2004 Apud BRITES, 2018)

A soldagem com arame tubular autoprotegido é bastante simples, uma vez que necessita apenas de uma fonte de energia e um apropriado sistema de alimentação, dispensando os reguladores de pressão, armazenagem e o sistema de alimentação de gás, necessários para soldagem com proteção gasosa.

Para Aquino Filho (2011) a proteção da poça de fusão é realizada pela decomposição do fluxo interno do arame, que pode exercer muitas funções, tais como: estabilização do arco, geração de gás, de vapor, de escória, adição de póis de ferro e elementos de liga que realizam a desoxidação e desnitração do cordão de solda.

Em virtude dessas características, pode-se concluir que o processo FCAW é uma excelente opção quando o objetivo é qualidade, produtividade e facilidade operacional. Por outro lado, devido a interação fluxo/metalo, o processo de soldagem por arame tubular é um método mais complicado do que o processo GMAW com arame sólido. E limita-se por expor um alto custo do arame tubular na base de peso em relação ao arame de eletrodo sólido

Levando em consideração que a área da seção transversal do arame tubular é menor que a do arame sólido para um mesmo diâmetro, o arame tubular exibe maiores densidades de correntes (SOUZA, 2011). Logo, a sua resistividade elétrica é maior e, consequentemente, maior calor é gerado por efeito Joule podendo-se adquirir taxas de fusão entre 30 a 35% superiores, manuseando arames tubulares.

Assim sendo, os critérios de soldagem são extremamente importantes no sentido de melhor e ajustar o processo, principalmente no que se refere aos modos de transferências e seus reflexos na qualidade da solda.

A utilização de arame tubular forneceu uma excelente qualidade ao metal de solda depositado, excelente aparência ao cordão de solda, boas características de arco, além de reduzir o número de respingos e oportunidade de soldar em todas as posições, tendo ganho de popularidade para soldagem de aços carbono e baixa liga, em chapas de espessura grossa e fina (SOUZA, 2011). Devido à polivalência dos arames, possibilitou-se a obtenção de um melhor nível de resistência mecânica e melhor tenacidade com uma maior taxa de deposição (MACHADO, 2009). Além disso, ainda, foi utilizado em maiores espessuras, onde a geometria de junta e posição de soldagem não admitia a aplicação de outros processos de alto rendimento, tal como o arco submerso. Entretanto trabalhar com o processo de arame tubular é uma tarefa que requer conhecimento quanto aos métodos de deposição do material. Sua taxa de produção reúne uma densidade de corrente elevada, podendo ocasionar problemas nas regiões adjacentes ao cordão de solda.

4.1.1. ARAMES TUBULARES

Os arames tubulares apresentam várias configurações de seção transversal, podendo ser simplesmente um tubo ou configurações mais complexas. O fluxo encontrado no interior do tubo metálico atua de maneira semelhante ao revestimento nos eletrodos revestidos. O fluxo pode ser composto tanto por óxidos inorgânicos com funções desoxidantes, desgaseificantes, geradores de gases para proteção, desnitrificantes, formadores de escória,

estabilizadores do arco elétrico, como também por elementos e ligas metálicas com funções de adição de elementos de liga, melhoria de propriedades químicas, mecânicas e elétricas do material depositado, estabilizadores do carbono e da matriz ferrítica (JOAQUIM, 2020).

A configuração da seção transversal (Figura 2.3) do arame não tem grande influência na aparência da solda, nas propriedades mecânicas ou químicas do arame final. No entanto, necessita-se da velocidade de alimentação para obter um dado nível de corrente (FERREE, 1992 Apud DIAS, 2009).

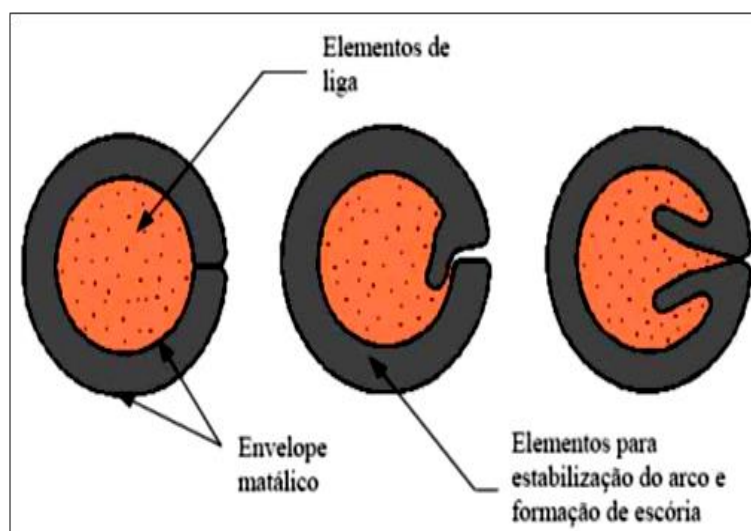


Figura 2.3 – Algumas formas de seção transversal dos arames tubulares (NORRISH, 1992).

A fabricação de arames tubulares é feita a partir de fitas metálicas na forma de bobinas. Esta é alimentada continuamente sendo deformada por meio de roletes até que fique com a forma de um "U", e em seguida é preenchida com o fluxo e/ou pó metálico que formará o interior do arame. Após esta etapa a fita passa por roletes de fechamento até adquirir a forma de tubo, com o fluxo na parte interna. O arame é então trefilado ou laminado até o diâmetro desejado e em seguida bobinado, embalado e identificado.

Com relação aos aços inoxidáveis, o processo de soldagem por arame tubular tem emprego na fabricação de modo geral, nos revestimentos, na união de metais dissimilares e no reparo de fundidos. Segundo Starling, Modenesi e Borba (2011) a maioria dos arames tubulares de aços inoxidáveis de pequeno diâmetro varia de 0,8 a 1,6 mm. Abaixo, listam-se os tipos e características básicas de cada um deles:

- Metal-cored: A maioria dos metais está em forma de pó no núcleo, soldagem com mesmas características que o arame sólido;
- Auto-protegido: Gera sua própria proteção gasosa, usados na posição plana e horizontal;
- Auto-protegido na Posição Plana (Flat position gas shielded): Para posição plana e horizontal;
- Auto-protegido em todas as posições.

4.2. SOLDAGEM DE REVESTIMENTO

As soldagens de revestimentos são obtidos através da união de materiais dissimilares, já que o consumível, além de ser mais nobre, em geral possui uma composição química significativamente diferente em relação ao substrato. Metais dissimilares são metais quimicamente diferentes (alumínio, cobre, níquel ferro) ou ligas metalurgicamente diferentes de um elemento em particular por exemplo, aço carbono e aço inoxidável. Combinações de metais dissimilares compreendem um ou mais metais de base e um ou mais metais de adição que formam a solda propriamente dita. As aplicações da soldagem de metais dissimilares incluem revestimento para resistência à corrosão e uniões de metais de base que exibem grande diferença de estrutura e propriedades

A soldagem de revestimento é definida pela AWS como a deposição de uma camada de metal de adição sobre a superfície de outro metal com o objetivo de obter propriedades ou dimensões desejadas. Basicamente, este processo é empregado quando se deseja uma das seguintes aplicações:

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

Palani e Murugan (2007) argumentam que os componentes industriais estão sujeitos aos mais diversos tipos de desgaste, o que demanda manutenções frequentes e faz com que

os custos de suas substituições sejam elevados. Consequentemente, a extensão da vida útil de tais componentes pode resultar em economias significativas.

Portanto, os diversos metais de adição são depositados com a finalidade de melhorar as propriedades de resistência à corrosão, resistência ao desgaste, resistência a altas temperaturas, aumento da dureza, controle dimensional ou para obtenção de algumas necessidades metalúrgicas (GOMES, 2010).

Tais características contribuem para que a soldagem de revestimento apresente as seguintes vantagens:

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

Alguns cuidados importantes no uso da soldagem de revestimento devem ser tomados em relação à geometria da peça, custo do procedimento de soldagem, desenvolvimento de trincas ou distorções a partir das tensões térmicas de soldagem e a qualidade desejada do revestimento. A qualidade do material depositado varia amplamente, dependendo da aplicação, do material utilizado e da habilidade do soldador.

Com isso, o processo de revestimento ocorre de forma que os cordões sejam depositados lateralmente e com um dado nível de sobreposição até que toda a região de interesse seja recoberta (Figura 2.4). O nível de sobreposição dos cordões depende da aplicação do revestimento e do processo de soldagem empregado.

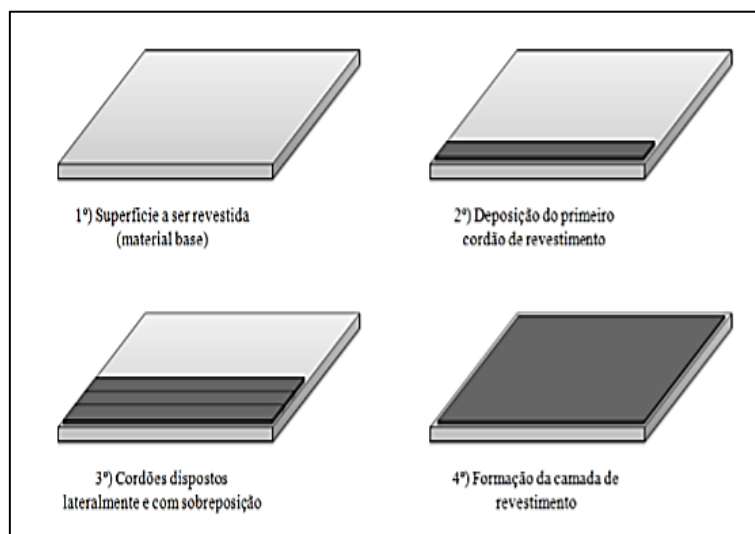


Figura 2.4 – Princípio de operação da soldagem de revestimento (GOMES, 2010)

A Figura 2.5 ilustra três exemplos reais de camadas de revestimentos depositados a partir de processos de soldagem.



Figura 2.5 – Exemplos de camadas de revestimento depositadas a partir de processos de soldagem (GOMES, 2010)

Segundo Garcia (2011) as operações de revestimento de metais são definidas como a aplicação de metal de adição sobre a superfície de um metal base, essa técnica tem a intenção melhorar ou adequar as propriedades mecânica e química da superfície para a

condição de serviço imposta no sistema. Dentre a vasta quantidade de categorias em se que pode classificar os revestimentos de acordo com o elementos envolvidos, existem quatro bastante utilizadas, elas são:

- Revestimento de aços inoxidáveis (“cladding”) – Um dos principais objetivos nessa categoria é ter uma melhor resistência a corrosão;
- Revestimento de reconstrução (“build-up”) – Essa categoria é vastamente utilizada para reparar materiais reavendo as dimensões originais das peças com o mesmo material;
- Amanteigamento (“buttering”) – O diferencial dessa categoria é a utilização de um ou mais passes de solda como processo intermediário, para potencializar as propriedades e poder unir as faces de forma mais eficiente, as propriedades mecânicas no centro diferentes são diferentes das faces envolvidas.
- Revestimento duro (“hardfacing”) – Objetivo da aplicação dessa categoria é de maneira geral elevar a resistência ao desgaste de peças sujeitas a abrasão, por exemplo, os martelos desfibradores, possuem uma matriz de aço baixo carbono e são recobertos por soldagem de revestimentos resistentes a abrasão (hardfacing).

O processo de soldagem Cladding é desenvolvido pela a união de metais diferentes. Diferentemente da soldagem por fusão ou colagem como método para unir os metais. O revestimento é geralmente obtido pela deposição de um metal de adição em forma de arame. Este processo é frequentemente usado para melhorar as propriedades mecânicas ou aumentar a resistência à corrosão, reparar peças desgastadas e fabricar compósitos de matriz de metal.

Entre os diversos materiais empregados neste tipo de soldagem, os aços inoxidáveis são os mais empregados, para resistir à corrosão e temperaturas elevadas em serviço, e tem um a boa soldabilidade.

O processo de revestimento de soldagem com aço inoxidável é definido como a deposição de uma camada de aço inoxidável em superfícies de aço de carbono ou aço de baixa liga para produzir revestimentos, com propriedades anti-corrosivas e resistências necessárias, para enfrentar ambientes sujeitos a desgastes elevados devido à corrosão ou cavitação, e os resultados obtidos utilizando a soldagem tornaram este bastante atraente (MURUNGAN; KANNAN, 2006).

4.2.1. CARACTERÍSTICAS DO PROCESSO CLADDING

Um fator importante para alcançar a qualidade final dos revestimentos é o controle sobre o processo. A este respeito, os efeitos de parâmetros de soldagem sobre os resultados do processo de revestimento são conhecidos por estarem relacionados em cordões com a menor quantidade possível de defeitos, e depositados na geometria desejada, com bom rendimento e um mínimo de desperdício de material. Para definir o tipo de processo de soldagem que melhor se adequa para revestir superfícies metálicas, alguns fatores são avaliados como: versatilidade, custo, fator operacional, habilidade do soldador, energia de soldagem, diluição, taxa de deposição, tamanho da peça, posição de soldagem, tipo de liga para revestimento, afinidade metalúrgica entre metal de base e metal de adição.

A Figura 2.6 ilustra dois tipos de soldagem: a soldagem de penetração e a soldagem de revestimento, sendo R o reforço, L a largura do cordão de soldagem e P a penetração. Na soldagem de penetração o objetivo é conseguir uma penetração grande, um pequeno reforço e a maior diluição possível, enquanto que na soldagem de revestimento deseja-se uma área de penetração pequena (região B), e uma de reforço maior possível (região A), e ainda a menor diluição possível. Ainda nesta mesma figura apresenta-se o cálculo da Diluição (D).

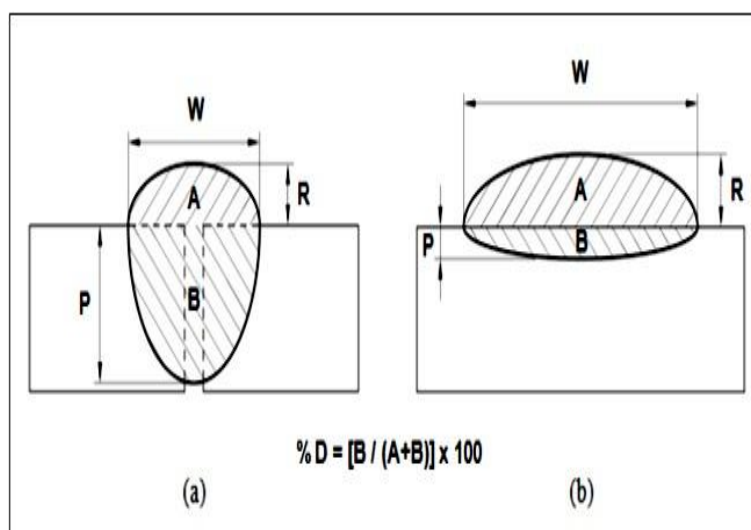


Figura 2.6 – Desenho da geometria do cordão: soldagem de penetração (a) e soldagem de revestimento (b). (GOMES et al, 2012)

A obtenção deste perfil geométrico característico é importante para que o processo permita recobrir a maior área possível com o menor número de passes, resultando em economias significativas de materiais e tempo. Assim, um dos maiores desafios da soldagem de revestimento consiste no ajuste adequado dos parâmetros do processo para que o material depositado adquira a geometria desejada.

A relevância de que os cordões de revestimento apresentem a geometria apropriada vem sendo destacada por autores como (KANNAN, 2006; SHAHI, 2008). A Figura 2.7 descreve o perfil geométrico desejado, segundo Kannan e Murugan, (2006), após a deposição de três cordões com uma sobreposição de 40% para o revestimento de aços carbono com aços inoxidáveis duplex.

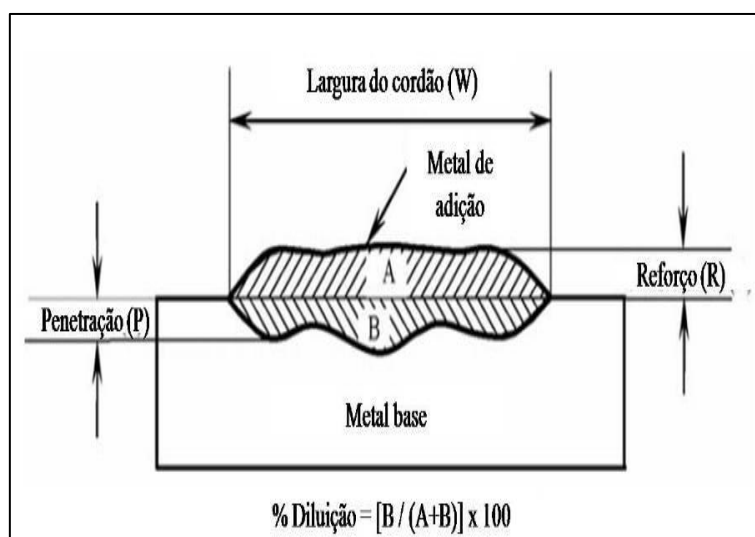


Figura 2.7- Geometria desejada para a deposição de três cordões de revestimento com uma sobreposição de 40% (KANNAN; MURUGAN, 2006)

4.2.2. SOLDAGEM DE REVESTIMENTO INOXIDÁVEL EM AÇOS CARBONO

O desenvolvimento do presente trabalho está ligado para a criação de superfícies com características especiais. Sendo assim, a soldagem de revestimento (over-lap) de aços carbono com aços inoxidáveis é definida por Palani e Murugan (2006, p.66) como a “deposição de uma camada de aço inoxidável sobre superfícies de aços carbono ou aços de baixa liga com o objetivo de obter revestimentos com propriedades de anti-corrosão”. Visto

que o preço dos aços inoxidáveis é aproximadamente dez vezes maior que o preço dos aços carbono, a principal vantagem deste processo está relacionada ao fato de que camadas anti-corrosivas podem ser produzidas de forma mais barata, a partir de materiais de menor custo, como os aços carbono. Além disso, o emprego de um procedimento de soldagem contribui para que os revestimentos sejam depositados com rapidez e economia de material.

Quanto às propriedades dos revestimentos de aços inoxidáveis, as características desejadas do material depositado, segundo Kannan e Murugan (2006), se resumem a uma resistência razoável, boa soldabilidade com o metal base e boas propriedades de resistência à corrosão geral e à corrosão localizada. Para Kannan e Murugan (2006) os revestimentos de aços inoxidáveis sobre aços carbono se mostram como uma boa solução para os problemas de elaboração de materiais que combinem altos níveis de propriedades mecânicas com boa resistência à corrosão.

As características anteriores têm feito da soldagem de revestimento de aços carbono com aços inoxidáveis uma operação de crescente aplicabilidade entre os mais diversos tipos de indústrias, como por exemplo, as indústrias petrolíferas, químicas, alimentícias, agrícolas, nucleares, navais, ferroviária, de construção civil, além várias outras

4.2.3. CARACTERÍSTICAS GEOMÉTRICAS E OPERACIONAIS PARA A SOLDAGEM DE REVESTIMENTO

4.2.3.1. DILUIÇÃO

A existência de fatores positivos para a soldagem FCAW faz com que este processo apresente suas peculiaridades. Um dos principais desafios da soldagem de revestimento consiste no ajuste adequado do procedimento de soldagem para que o cordão seja depositado com a geometria desejada. Além disso, para o caso de revestimentos de aços carbono com aços inoxidáveis, verifica-se que as propriedades e a qualidade final dos revestimentos são fortemente influenciadas pelo percentual de diluição. Na medida em que o processo FCAW se propõe à união de materiais com composições químicas diferentes, a mistura dos elementos presentes no aço carbono com os elementos do aço inoxidável pode comprometer as propriedades finais de anti-corrosão, o que inviabiliza esta operação. Portanto, o controle da diluição se caracteriza como um dos requisitos mais importantes da soldagem de revestimento de aços carbono com aços inoxidáveis.

A diluição é definida como a relação entre a área de penetração e a área total da seção transversal do cordão de solda. Assim, o aumento da penetração provoca o aumento da área de penetração e esta, conseqüentemente, aumenta o nível de diluição. No caso da união de materiais diferentes, o aumento da diluição faz com que exista uma maior difusão entre os elementos presentes na composição química dos respectivos materiais.

A Figura 2.8 ilustra a afirmação anterior, indicando que a união de materiais com composições químicas diferentes tende a difundir os elementos entre o metal base e do metal de adição, o que pode resultar na formação de novos compostos (Figura 2.8a). Dessa forma, o aumento da penetração e, conseqüentemente, da diluição, faz com que a região de contato entre os materiais também aumente, resultando em uma maior difusão entre os seus elementos (Figura 2.8b).

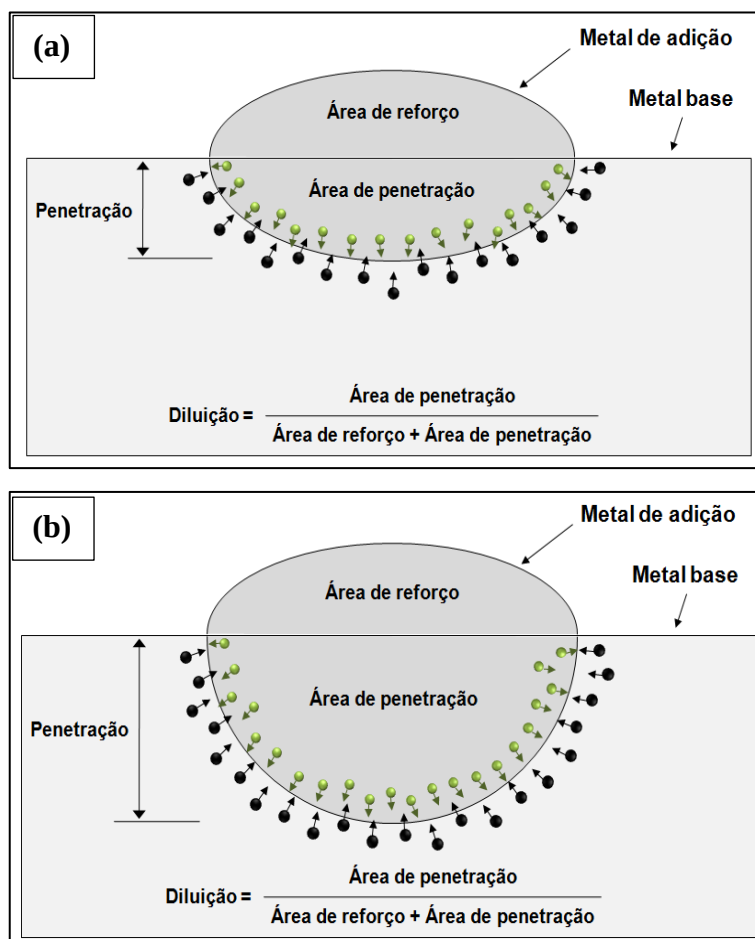


Figura 2.8 – Aumento da difusão entre os elementos do metal base e do metal de adição em função do aumento do nível de diluição (GOMES, 2010).

Quando se trata do revestimento de aços carbono com aços inoxidáveis, o aumento da interação entre os materiais se mostra como um fator prejudicial aos resultados do processo, já que compromete as propriedades finais de resistência à corrosão e geometria do cordão de solda. Isto explica porque diversos pesquisadores citados no texto como Murugan, Shahi, Pandey apresentam o controle da diluição como um dos fatores de maior importância para a qualidade final dos revestimentos de aços inoxidáveis.

Shahi e Pandey (2008) afirmam que o aumento da diluição reduz os elementos de liga e aumenta o conteúdo de carbono da camada revestida, reduzindo as propriedades de resistência à corrosão além de causar outros problemas metalúrgicos.

Para Palani (2007), o nível de diluição depende da diferença entre as composições químicas do metal base e metal de adição, da diluição inerente ao processo de soldagem utilizado e da técnica de soldagem. Além disso, independentemente do processo de soldagem escolhido, as variações na diluição são fortemente influenciadas pelas variáveis do processo, tais como corrente, tensão e velocidade de soldagem.

A existência de todas essas características tem contribuído para que o estudo e desenvolvimento de procedimentos capazes de oferecer uma diluição ótima se tornassem de grande importância nos últimos anos. Entretanto, apesar de valores mínimos de diluição serem desejados, Murugan e Parmar (1997 Apud Ribeiro, 2014) sugerem que esta diluição mínima deve variar entre 10% e 15%, para satisfazer a resistência de união entre o metal base e o metal de adição.

Miranda, Silva, Motta e Miranda (2015) afirmam que revestimentos com diluição superior a 10% aumentam o teor de ferro do metal de solda e reduzem consideravelmente a resistência à corrosão das ligas de níquel. Baseado nisso, o teor de ferro permitido nos revestimentos destinados a condições severas de serviço deve ser igual ou inferior a 5%p. de sua composição química global.

Pessoa e Miranda (2010) afirmam que a diluição pode ser afetada significativamente pela tensão de referência (U_r), velocidade de soldagem (V_s) e pelo movimento de oscilação da tocha. Com o aumento da tensão de referência há um aumento nos valores de diluição dos cordões de solda. Isto se deve ao fato que para maiores valores de tensão de referência tem-se um maior comprimento de arco, que por sua vez proporciona uma coluna de plasma mais ampla em sua extensão, ou seja, com isso o cordão de solda torna-se mais largo e mais achatado proporcionando um pequeno reforço que não atua como uma barreira. Já a velocidade de soldagem encontra-se numa faixa que uma maior velocidade implica em um

menor aporte térmico por unidade de comprimento imposto à peça o que resulta em uma menor penetração e consequentemente uma menor diluição.

Gomes (2010), estudando os efeitos da diluição em função dos parâmetros de soldagem afirma que menores níveis de diluição foram observados para baixas tensões, baixas velocidades de soldagem e altas distâncias bico de contato peça. A velocidade de alimentação se mostrou como um parâmetro pouco significativo para esta resposta. O Pesquisador ainda observou que em condições de baixas tensões e baixas velocidades de soldagem, a penetração é baixa e o reforço é alto. Logo, a área de reforço aumenta e a área de penetração diminui, resultando em baixos percentuais de diluição. O mesmo raciocínio é válido para a distância bico de contato peça. Em condições de maiores distâncias, foram observadas baixas penetrações e altos reforços, levando à diminuição da diluição.

4.2.3.2. MOVIMENTO DE TECIMENTO

Embora existam trabalhos na literatura sobre a exploração dos parâmetros de soldagem visando a deposição de revestimentos, poucos dedicam-se a avaliar o efeito do tecimento. O movimento de tecimento é usado normalmente como parâmetro estético e ergonômico nos procedimentos de soldagem, porém estas translações realizadas pelo metal de adição podem influenciar significativamente a geometria e as características metalúrgicas do cordão de solda.

Silva e Miranda (2014) utilizaram como método de teste 3 padrões de tecimentos, cuja trajetória foi predefinida na programação do equipamento de soldagem: espiral, triangular, duplo 8. As trajetórias dos tecimentos são ilustradas na Figura 2.9.

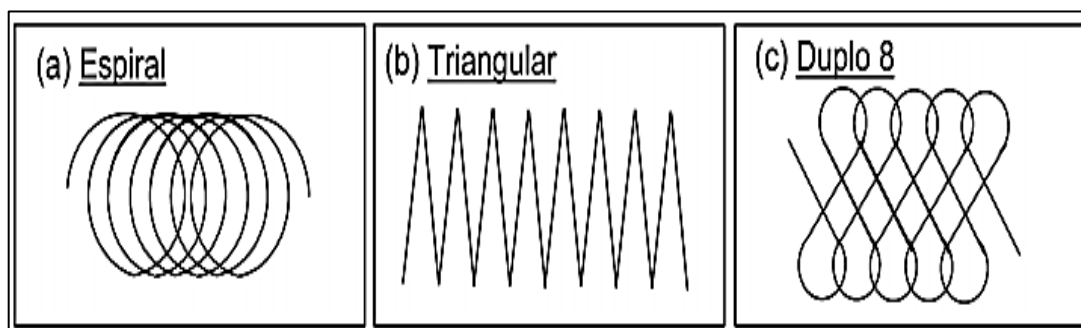


Figura 2.9. Desenho ilustrando a trajetória descrita para cada tipo de tecimento (SILVA; MIRANDA, 2014)

Miranda e Silva (2014) relatam que o uso do tecimento triangular influencia consideravelmente a geometria do cordão de solda e o nível de diluição, sendo este último variando de 5,37% sem o uso do tecimento, para 1,52% com uso do tecimento. Com uso do tecimento o reforço do cordão de solda reduziu e a largura aumentou, proporcionando uma melhor distribuição de material sobre a peça, reduzindo com isso a razão reforço/largura (R/L), parâmetro este que indica o grau de convexidade do cordão de solda. Uma razão R/L alta, indica que o grau de convexidade pode ser excessivo, dificultando com isso uma adequada sobreposição de passes para soldagem posterior de revestimentos, com a possibilidade de formação de vazios entre os mesmos. Quanto a penetração e a diluição, ambas apresentaram comportamentos similares, com redução de forma significativa nas condições em que o tecimento é empregado. Estes resultados mostram que o uso do tecimento garante uma combinação de baixa razão R/L com baixa diluição, condição esta desejável para soldagem de revestimentos.

Neste trabalho, verificou-se uma grande contribuição do tecimento tipo duplo 8 em relação aos demais. Neste tipo de tecimento o arco descreve uma trajetória em forma de hélice que faz com que o arco avance pouco para frente, fazendo com que haja uma menor perda de calor, se comparado aos tecimentos triangular e espiral, cujo deslocamento à frente é maior, evitando perdas excessivas de calor e melhorando o escoamento do metal líquido na borda do cordão anterior. O tecimento em espiral, embora contribua significativamente para a redução da diluição, causa uma forte instabilidade ao processo, resultando na maioria dos casos em defeitos superficiais ou defeitos entre passes.

Mendes (2018) relata em seu trabalho que a utilização das técnicas de tecimento de modo geral demonstraram ganhos positivos em relação a soldagem sem a oscilação transversal no processo de soldagem, dentre eles, redução dos carbetos, constância ou diminuição na quantidade de trincas, um aumento de dureza na superfície e maior molhabilidade da solda na chapa de aço.

A oscilação da tocha interfere na forma do surgimento e quantidade de trincas durante o processo de solidificação e resfriamento do revestimento, o processo de soldagem sem uso do tecimento demonstra mais trincas do que os processos com o uso da técnica. As técnicas de tecimento proporcionam variações geométricas, aumentando a largura do cordão do revestimento e diminuindo a altura do reforço, em relação a soldagem sem oscilação, o que pode proporcionar uma maior área coberta de revestimento com a mesma velocidade de aplicação.

As amostras sem tecimento apresentam as maiores alturas do revestimento, porém com menores larguras do cordão de solda, e em relação a profundidade da penetração do material do arame tubular sobre o metal de base, demonstram valores próximos. A oscilação da tocha também interfere no resultado da soldagem, demonstrando um valor de diluição para o processo com o uso das técnicas abordadas de tecimento maior do que a amostra sem o uso.

Mendes (2018) fez um comparativo para 3 tipos de tecimentos, comparado os arames tubulares FeCrC+Nb e FeCrC+Ti e avaliou como resposta área de reforço, área fundida e diluição das camadas de revestimentos. A diluição do revestimento sobre o metal de base foi maior no caso do revestimento com adição de FeCrC+Ti quando se fez o uso do tecimento durante a soldagem e valores similares quando o processo ocorreu de forma linear. A mesma relação entre a diluição dos arames foi encontrada nos trabalhos de Lima (2008) e Garcia (2011), a razão da diluição no revestimento composto por FeCrC+Ti foi justificado por Lima (2008) devido a uma maior fluidez na poça de fusão. Também foi verificado que o revestimento com uma camada e com a utilização da técnica de tecimento obteve uma diluição em torno de 37,5% e para os CP sem o uso da técnica, a diluição ficou em torno de 35%. Observando as amostras com duas camadas, foi possível ver que as amostras sem a oscilação também apresentaram menor diluição, devido a menor largura do cordão promovendo um menor contato com o metal de base e a velocidade de alimentação gerando uma altura de reforço mais elevada do que das amostras com o uso das técnicas de tecimento, e dentre desses, o uso da movimentação trapezoidal obteve a maior diluição.

4.2.4. INFLUÊNCIA DA POLARIDADE EM REVESTIMENTOS

Um dos maiores problemas da aplicação de revestimentos por soldagem é a convexidade excessiva do cordão, que dificulta a obtenção de camadas de revestimento de maiores espessuras livres de defeitos (principalmente entre cordões). A necessidade de multicamadas para atender a espessura mínima aumenta a possibilidade de defeitos.

Kovalenko (2014) percebeu que os modos operacionais CC^+ e CC^- do processo MIG/MAG Polaridade Variável (MIG/MAG Corrente Alternada) apresentam características bem diferentes, até contrárias. A combinação destes modos operacionais por tempos maiores do que usado normalmente no MIG/MAG Polaridade Variável, consequentemente com menor frequência de mudança de polaridade, poderia conectar as vantagens e evitar ou

minimizar as desvantagens deles. Além disso, a distribuição das fases de corrente (CC- e CC+).

Aplicação de MIG/MAG polaridade variável para revestimentos na largura do cordão (utilizando tecimento transversal) faz com que mais calor seja aportado nas laterais (aumento de largura) e que menos calor seja aportado quando a tocha estiver transitando no espaço entre as laterais da poça (diminuição da diluição). Seu grande objetivo foi aproveitar todas as características acima apontadas e tentar controlar a distribuição de calor ao longo do cordão durante a soldagem.

Um dos principais problemas da polaridade em soldas de Over-lap é que sua influência na geometria do cordão de solda. A polaridade positiva do eletrodo, comumente utilizado para solda de deposição não é adequada para a soldagem de revestimento, onde são requeridos maiores largura e reforço, assim como pequena penetração.

Marinho e Braga (2005) estudaram a influência da polaridade negativa pelo processo MIG aplicado em soldas de revestimentos e constataram que a polaridade exerceu influência sobre todas as variáveis de resposta (Reforço, Largura, Penetração e Diluição). Verificou-se um significativo aumento do reforço com a inversão de polaridade, sendo os maiores valores obtidos em CCEN (polaridade negativa). A largura do cordão apresentou um crescimento regular com a corrente quando se utilizou a condição CCEP (polaridade Positiva), estando estes resultados de acordo com aqueles obtidos por Corrêa (2006). Já na condição CCEN, este parâmetro geométrico não apresentou regularidade em seu comportamento. Verificou-se ainda a grande influência da polaridade sobre a largura do cordão, sendo que os maiores valores foram obtidos na condição CCEP.

Outro fato importante foi que a penetração não apresentou regularidade em seu comportamento, tanto em CCEP quanto em CCEN, em resposta à variação da corrente. A polaridade, porém, propiciou uma considerável redução nos valores deste parâmetro geométrico. Este comportamento da penetração em resposta à inversão de polaridade é pertinente aos processos a arco elétrico com transferência metálica no arco. De acordo com Machado (2009), este fato se deve à distribuição de calor do arco elétrico, sendo a penetração menor em CCEN. A diluição praticamente não foi alterada para os três níveis de corrente média em CCEN. Entretanto, em CCEP esta característica apresentou uma tendência de aumento mais acentuada conforme o valor de I_m foi incrementado, o que deve ter sido decisivo para que este parâmetro fosse afetado estatisticamente pela corrente.

A polaridade negativa altera de maneira drástica o comportamento do processo MIG/MAG, modificando a distribuição de energias entre o eletrodo e a peça. Como demonstrado por Kim (2007). Na Figura 2.10, no processo com corrente contínua constante e eletrodo positivo (CCEP), a maior concentração de calor acontece na peça. No entanto, em eletrodo negativo (CCEN), essa situação se inverte sendo grande parte do calor concentrado no eletrodo, e com isso ocorre aumento da taxa de fusão, aumento da tensão do arco elétrico, diminuição da temperatura na peça e redução da penetração.

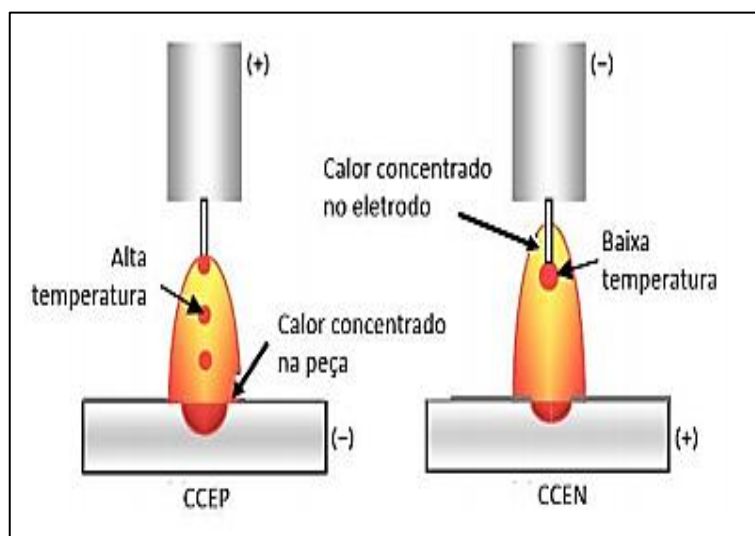


Figura 2.10 – Comportamento do arco em CCEP e CCEN (KIM, 2007).

Park (2009) constatou que a utilização do eletrodo negativo (EN) comparado com o MIG/MAG convencional apresenta menores valores de temperatura na peça. Em consequência disto, verificaram uma redução da deformação da peça final, assim como uma menor penetração. Este benefício consiste em verificar a redução na temperatura da peça soldada com o aumento da utilização do eletrodo negativo. Pode-se realizar uma analogia com o processo de soldagem TIG (Tungsten Inert Gas), quando em CCEN, cerca de 70% do calor proveniente do processo de soldagem é destinado ao metal base, esta proporção se inverte quando em CCEP, onde cerca de 70% do calor permanece no eletrodo, e para corrente alternada ocorre um balanço da distribuição da temperatura. Lembrando que os efeitos de polaridade entre os processos de soldagem TIG e MIG/MAG se invertem devido ao fluxo dos elétrons (da emissão termiônica), sendo CCEP para MIG/MAG igual a CCEN para TIG, onde a maior parte do calor é destinada ao metal base

4.3. VARIÁVEIS ELÉTRICAS E OPERACIONAIS DO PROCESSO DE SOLDAGEM

Na soldagem por fusão com arco elétrico, o soldador ou operador de soldagem, controla um grande número de variáveis intrínsecas ao processo de soldagem, que afetam diretamente ou indiretamente a geometria do cordão de solda. Um soldador experiente e qualificado procura controlar as variáveis e ajustá-las corretamente durante a soldagem para manter sempre o processo com a melhor qualidade possível.

Segundo Modenesi (2012), as variáveis de um processo de soldagem apresentadas na Tabela 2.1, podem ser divididas em quatro níveis: variáveis pré-determinadas, variáveis de fundo, variáveis primárias e secundárias. As variáveis de fundo são definidas na fase inicial de produção e, em alguns casos, são determinadas em função da disponibilidade dos equipamentos e materiais. As variáveis primárias e secundárias são particularmente importantes, pois estas variáveis (principalmente as primárias) são estabelecidas por último na obtenção de um procedimento de soldagem adequado em termos de qualidade e produtividade.

Tabela 2.1 – Variáveis de soldagem e descrição. (Adaptado de MODENESI, 2012).

VARIÁVEIS	DESCRIÇÃO
Pré-determinadas	Espessura e tipo do metal de base; propriedades requeridas do metal de solda e da zona afetada termicamente
Fundo	Processo de soldagem; tipo do equipamento; técnica básica de soldagem; projeto da junta; tipo do eletrodo, fluxo e gás, etc; diâmetro do eletrodo
Primárias	Corrente (tipo e valor); tensão; velocidade de soldagem.
Secundárias	Distância bico de contato peça; posicionamento do eletrodo/tocha e relação à peça.

Para a execução do processo de soldagem com revestimento estas variáveis são estudadas de forma detalhada, sendo cada uma responsável por um fenômeno geométrico ou metalúrgico nos cordões de solda. Segundo a “American Society of Materials” ASM, a área do revestimento pode variar entre 5 a 50% da espessura do material, mas geralmente as

aplicações convencionais são da ordem de 10 a 20%, com a espessura mínima de 1,5 mm. Dessa forma, para revestir peças metálicas é necessário um balanceamento das variáveis de trabalho, visando obter condições aceitáveis para sua aplicação.

Entre alguns parâmetros utilizados na soldagem com arame tubular podem ser citadas a intensidade da corrente, a tensão de soldagem, a distância do bico de contato peça (DBCP), a velocidade de soldagem, o tipo e a vazão do gás de proteção, a velocidade de alimentação do arame, a posição de soldagem, o diâmetro e o tipo do metal de adição, o tipo de transferência metálica e a estabilidade do arco elétrico. A Figura 2.11 ilustra a nomenclatura dos elementos para o arco elétrico no processo MIG/MAG e arame tubular.

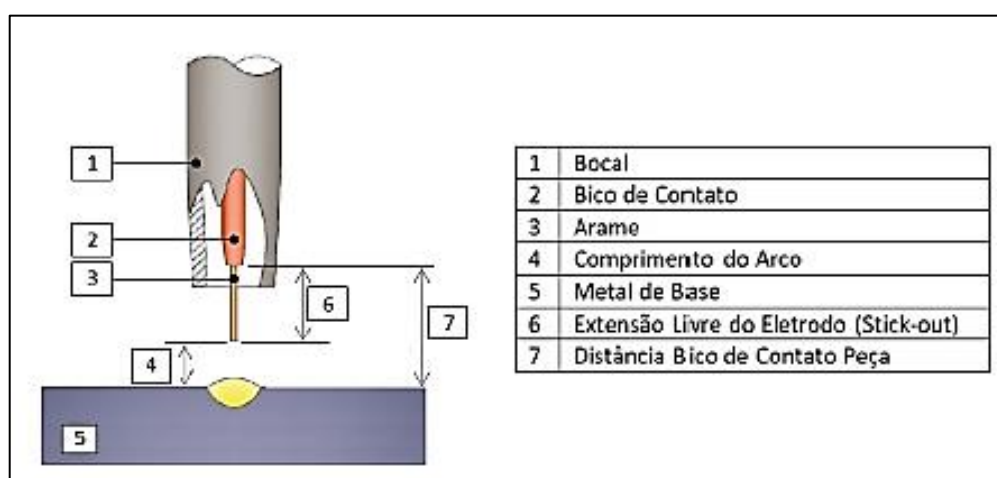


Figura 2.11- Nomenclatura dos elementos para Soldagem a arco elétrico no processo MIG/MAG e arame tubular (Adaptado de AWS, 1991)

A intensidade da corrente é a principal responsável pela penetração e tem uma característica proporcional, determinando a taxa de deposição e modo de transferência do metal; e ainda determina a velocidade de alimentação do arame. Se a intensidade de corrente for alta, pode ocorrer excesso de respingos, gotas com grande diâmetro e caso a velocidade de alimentação do arame não for correta, pode ocorrer um excesso/falta de arame se a corrente elétrica não suficiente para fundir o metal de adição.

A tensão do arco elétrico está relacionada com a extensão do arco elétrico, e com tensões maiores há um aumento do arco elétrico, e pode causar um aumento de respingos e instabilidade do arco elétrico, se a tensão do for muito baixa, a extensão do arco elétrico será pequena e fará com que o arame “mergulhe” na poça de fusão. O aumento da tensão ainda irá ocasionar um cordão mais largo, e a redução da tensão altera a geometria do cordão, fazendo com que se torne convexo.

A DBCP peça vai influenciar o calor desenvolvido pelo efeito Joule, quanto maior este parâmetro maior o efeito Joule (I^2R), influenciando a fusão do consumível e o aquecimento do fluxo interno do arame. Se esta distância for excessiva irá ocasionar muitos respingos e cordões convexos, se esta distância for muito pequena, poderá ocorrer instabilidade do arco elétrico. Segundo Machado (2009), para arames tubulares autoprotetidos a DBCP pode variar entre 20 e 90 mm, e para arames tubulares com proteção gasosa, a distância pode se situar entre 20 e 40 mm.

A velocidade de soldagem influencia a geometria do cordão de solda, quando alta torna o cordão convexo e a penetração diminui, se pequena pode ocorrer inclusão de escória, cordão irregular, alteração nas propriedades metalúrgicas na estrutura do material por causa da concentração térmica. A quantidade de energia cedida à peça está relacionada com a velocidade de soldagem, quanto maior a velocidade de soldagem, menor a quantidade de calor cedida por unidade de área, alterando o tamanho da zona termicamente afetada.

O gás de proteção tem como função principal, proteger a poça de fusão e a ponta aquecida do eletrodo da contaminação atmosférica, principalmente do hidrogênio que pode ocupar os interstícios dos átomos, propiciando ocorrências de trincas e porosidades.

Segundo Tatagiba, Gonçalves e Paranhos (2012) o gás de proteção é uma variável importante desempenhando outras funções como as características de ionização, formação e estabilidade do arco elétrico, o tipo de transferência metálica, as propriedades do metal depositado, o volume de fumos e respingos, a morfologia do cordão de solda e a velocidade de soldagem. Na soldagem que utiliza como metal de adição aços de baixo carbono, o CO_2 é comumente empregado como gás de proteção (MARQUES, 2009). Quando 1 a 2% de oxigênio são adicionados ao argônio, esta mistura é recomendada para soldagem de aços inoxidáveis e acima de 5% de oxigênio a mistura é utilizada para soldar aços de baixo carbono e ligas de cobre.

De acordo com Machado (2009), a adição de O_2 no argônio propicia um arco estável e reduz os respingos, além de aumentar sensivelmente a fluidez da poça de fusão, resultando num cordão com geometria adequada, facilitando assim a emissão de elétrons, diminuindo a tensão superficial e facilitando a transferência metálica.

Batista (2011) estudou a aplicação de revestimentos de solda em ligas de níquel usando o método de transferência a arco pulsado. Foi observado que os menores valores de diluição são obtidos para os níveis inferiores de corrente de pico e corrente de base, sendo a

velocidade de alimentação uma variante desse ensaio, podendo ser utilizada em seu nível superior.

Gomes (2010) observou que para soldagens de revestimentos utilizando arame tubular inoxidável austenítico, a variação dos parâmetros operacionais fornece bastante influência na geometria do cordão de solda. No trabalho desenvolvido o autor relata os efeitos principais sobre a geometria do cordão de revestimento, mostrando como a largura, penetração, reforço e diluição são influenciados pelos parâmetros da soldagem com arame tubular. Foi observado que o aumento da velocidade de alimentação, da tensão elétrica, a diminuição da velocidade de soldagem e da distância bico de contato peça implicam em maiores larguras do cordão. Isto ocorre porque o aumento da velocidade de alimentação faz com que a corrente de soldagem e a quantidade de material depositado aumentem, resultando em maiores dimensões para o cordão. Da mesma forma, o aumento da tensão está positivamente relacionado com o aumento da largura, ou seja, quanto maior a tensão maior a largura e vice-versa. Quanto à velocidade de soldagem, menores velocidades fazem com que maiores quantidades de material sejam depositadas num dado comprimento a cada unidade de tempo, resultando em maiores dimensões. Para a distância bico de contato peça, o aumento da distância aumenta o comprimento e o efeito Joule do arco elétrico, gerando uma queda de calor na poça de fusão. Esta queda de calor faz diminuir as dimensões do cordão. Assim, menores distâncias produzem maiores larguras.

Gomes (2010), também observou que a diminuição da velocidade de alimentação e da tensão resulta em menores penetrações, devido à queda da corrente e da energia de soldagem provocados pela redução destes dois parâmetros. E a velocidade de soldagem apresentou um ponto de curvatura para esta resposta, alcançando uma penetração máxima para uma velocidade próxima aos 44 cm/min. Menores valores de penetração foram observados nos níveis extremos de velocidade de soldagem.

Colaço, Peruchi, Bernadi e Maranhão (2012) Trabalharam com a energia de soldagem em dois níveis: alto e baixo. Essa variação de potência de energia foi obtida através da variação da tensão (V) e velocidade de alimentação do arame (Valim), mantendo constante a velocidade de soldagem, a distância entre o bico de contato e a peça e o ângulo da tocha de soldagem. Os resultados mostraram que com o aumento da energia de soldagem, houve redução na diluição. Porém, não houve alteração significativa da perda de massa para os níveis de energia usadas para a deposição dos revestimentos. A largura do cordão de solda foi a variável mais influenciada pela energia de soldagem, apresentando maiores valores para

altas energias de soldagem, já a diluição dos cordões de solda apresentou valores maiores para menores energias de soldagem.

Silva, Macie e Santos (2010) analisando a zona térmica afetada pela energia de soldagem perceberam um incremento na extensão da zona termicamente afetada (ZTA) e na formação de zonas parcialmente diluídas (ZPD), ao longo da linha de fusão com valores de dureza acima de 300HV, para maiores valores de energias de soldagem,

Gomes (2010) ainda afirma que o aumento do reforço, outra característica importante para as soldas de revestimentos, está relacionado as baixas tensões e velocidades de soldagem e a altas velocidades de alimentação e distância bico de contato peça. A relação entre reforço e tensão se caracteriza como uma relação inversa, ou seja, menores tensões resultam em reforços maiores e maiores tensões geram menores reforços. Para a velocidade de soldagem, menores velocidades causam maiores deposições de material por unidade de tempo, o que gera o aumento das dimensões do cordão. A obtenção de maiores reforços em maiores velocidades de alimentação também diz respeito ao aumento da corrente de soldagem e da quantidade de material depositado.

4.4. CONSIDERAÇÕES FINAIS

A revisão bibliográfica teve como objetivo relatar informações sobre o comportamento das variáveis do processo de soldagem FCAW-G em função das características geométricas e qualitativas do cordão de solda para revestimentos, aplicados ao aço carbono SAE 1020, metal de base para os testes. Dessa forma, todo o conteúdo abordado neste capítulo teve como foco, interagir com os procedimentos de soldagem para fornecer informações sobre o assunto de estudo da dissertação. Portanto a partir da discussão dos conceitos relacionados à soldagem de revestimentos, nota-se que esta aplicação nos processos indústrias fornece um caminho rápido e acessível quando se deseja o prolongamento da vida útil de peças, a recuperação de componentes industrial e a proteção das superfícies contra o ambiente externo. Além das informações citadas, no trabalho foi possível demonstrar a influência dos parâmetros operacionais e elétricos da geometria do cordão de solda para revestimentos, destacando a diferença entre os processos tradicionais de deposição.

Nesse cenário, foi determinado a soldagem de revestimento de aços carbono com aços inoxidáveis, revelando que a grande utilidade deste procedimento consiste na deposição de camadas anticorrosivas a partir de materiais de baixo custo, dado que os componentes de

aços inoxidáveis apresentam custos elevados. Entretanto, além do perfil geométrico desejado, a soldagem de revestimento de aços carbono com aços inoxidáveis também deve se preocupar com o controle da diluição entre o metal base e o metal de adição, para que as propriedades da camada protetora não sejam prejudicadas, assim como a polaridade, para proporcionar um controle eficiente da energia de soldagem e da geometria do cordão de solda. Em seguida, os fundamentos da soldagem com arame tubular foram apresentados, caracterizando este como um processo de elevada qualidade do material soldado.

CAPÍTULO III

5. PROCEDIMENTO EXPERIMENTAL

Neste momento será descrito a metodologia experimental, na qual serão inseridas as informações para o desenvolvimento da pesquisa. Dessa forma, os dados anexados neste capítulo têm como objetivo esclarecer a execução de cada etapa do trabalho, mostrando por detalhes como foi executado cada ensaio para se obter os resultados finais.

5.1. PROPOSTA

Em consonância com os objetivos apresentados no primeiro capítulo dessa pesquisa, a proposta do trabalho visa encontrar um arranjo adequado para os parâmetros de soldagem que concedam a potencialização das características geométricas do cordão de revestimento e da produtividade do processo, assegurando, concomitantemente, níveis equilibrados de qualidade. À vista disso, seguindo considerações adequadas para a geometria do cordão de revestimento, pretende-se o:

- Incremento da largura do cordão;
- Incremento do reforço;
- Redução da penetração;
- Redução da diluição

Em relação a qualidade do processo, busca-se a::

- Redução do índice de convexidade

O presente trabalho seguiu o fluxograma de atividades da Figura 3.1, planejando e executando as etapas para alcançar os objetivos apresentados no capítulo 1.

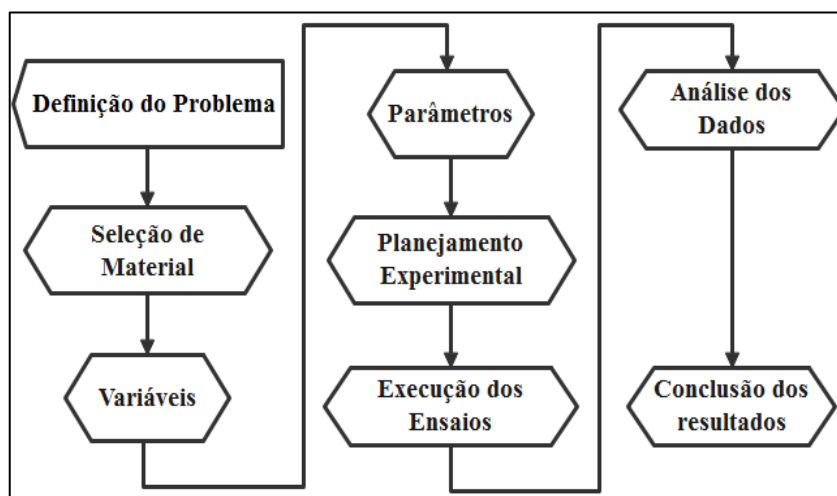


Figura 3.1 - fluxograma para a metodologia experimental

5.2. SELEÇÃO DO MATERIAL

Para iniciar a pesquisa utilizou-se para o metal de base, o aço SAE 1020 trefilado, elemento integrante da família dos aços carbono, muito comum nas indústrias por apresentar propriedades mecânicas equilibradas, atrelada a um baixo custo e por ser um material com excelente soldabilidade. Na tabela 3.1 encontram-se respectivamente sua composição química e suas propriedades mecânicas.

Tabela 3.1- Composição química e propriedades do aço inoxidável SAE 1020 (Fonte: JPATRÍCIO METAIS, 2020)

C	P	Mn	Si	S	HB	L.E. [MPa]	L.R. [MPa]	A [%]
0,20	0,03	0,45	0,2	0,05	121	350	420	40

5.3. EQUIPAMENTOS DE SOLDAGEM

Já para o procedimento de soldagem optou-se pela seleção do processo FCAW-G com corrente contínua, por ser um procedimento que proporciona um bom controle de qualidade nas etapas de soldagem, um bom equilíbrio na deposição de energia térmica e por ser um processo de grande aplicabilidade na indústria.

Para o andamento da pesquisa, montou-se uma parceria com o IFCE-Tabuleiro do Norte. A instituição forneceu a estrutura do seu laboratório de soldagem, juntamente com os seus equipamentos. Como era necessário um equipamento mais robusto para o controle dos parâmetros operacionais e elétricos do processo de soldagem, selecionou-se a fonte multiprocesso DIGIPlus A7, da empresa IMC, um produto com tecnologia e projeto totalmente nacional, voltado para o ambiente de ensino e pesquisa na área de soldagem (Figura 3.2).

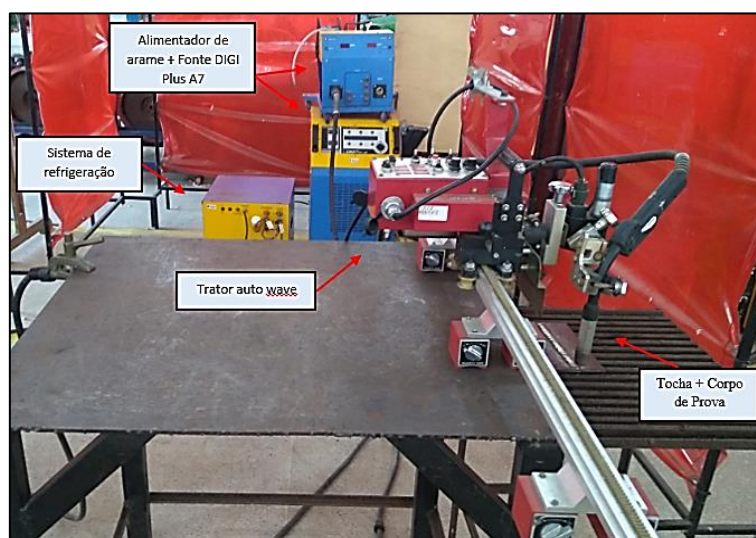


Figura 3.2- Célula de soldagem automatizada

As fontes de soldagem que fazem parte dessa linha possuem um processador ARM de 32 bits, o que permite operar com várias modalidades de soldagem e elevado desempenho no controle do arco e da transferência metálica. Suas principais características técnicas se encontram na Tabela 3.2.

Tabela 3.2 - Dados Técnicos Fonte Eletrônica Transistorizada DigiPlus A7

Capacidade de Corrente					
Características	200	350	450	600	800
Tensão de alimentação	220/380/	220/380/4	220/380/4	220/380/4	220/380/4
	440	40	40	40	40

Tensão em vazio	50/68/85 V	50/68/85 V	50/68/85 V	50/68/85 V	50/68/85 V
Faixa de corrente	5- 300 A	5- 400 A	5- 400 A	5- 600 A	10 - 800 A
Corrente nominal por fase (220/380/440)	18/10/9A	21/12/11 ^a	26/15/13A	32/18/16 A	42/25/21 A

Em relação a seleção dos parâmetros e dos processos na máquina de solda DigiPlus A7, utiliza-se o teclado do controle remoto, tomando como base somente as funções que foram utilizadas. Para o trabalho proposto, o processo selecionado foi o MIG/MAG com corrente contínua, portanto no menu principal da fonte, o primeiro passo a ser realizado é a escolha do tipo de soldagem, após a seleção é disponibilizado uma nova página de menus, desta vez para selecionar o modelo de operação, como pode ser observado na figura 3.33. Após a seleção do modo de deposição do metal, escolhe-se a opção “Modo Normal” e logo em seguida “Modo Variáveis”. Como o processo irá desempenhar uma única condição de trabalho para cada cordão de solda, deve-se selecionar a função “ 1 Fase”, a qual estabelece uma operação constante entre as variáveis operacionais. Após a seleção da quantidade de fases, aparecerá um menu com 4 opções, a qual o operador deverá selecionar os valores para cada variável de trabalho.

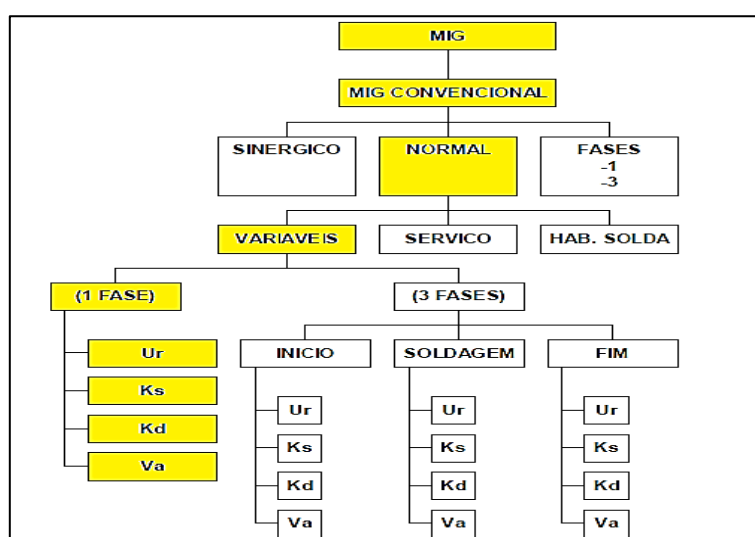


Figura 3.3 - Fluxograma para seleção do processo MIG-N

Para otimizar o processo de soldagem, utilizou-se o trator “auto wave de oscilação automática”, figura 3.4. O trator é motorizado e possui base magnética, este se movimenta livremente ou com o auxílio de trilho magnético próprio.

Este equipamento é capaz de produzir soldas de forma totalmente automática, permitindo ajustes para velocidade de avanço, velocidade de oscilação e movimentos de tecimentos.

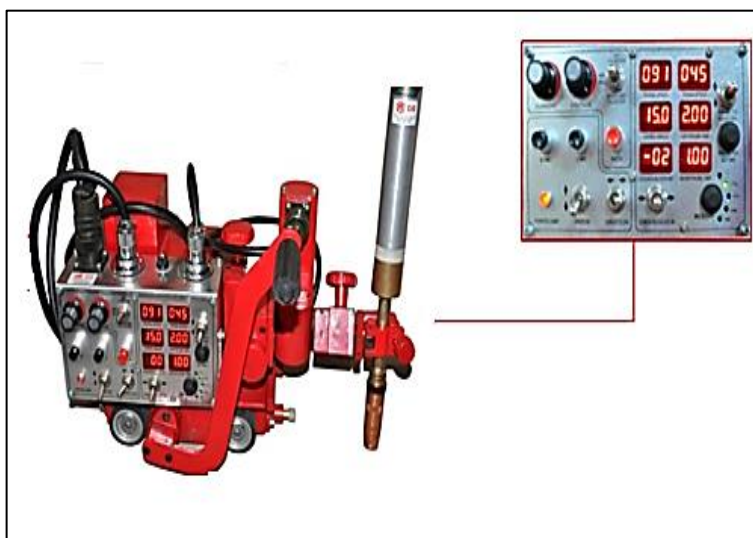


Figura 3.4- Trator auto wave de oscilação automática (CIG, 2020)

Para monitorar e aquisitar os dados relativos aos ensaios de soldagem, foi utilizado um sistema de aquisição de dados da empresa IMC, o SAP 4.01, figura 3.5. Este equipamento é um dos existentes no mercado para análise dos sinais elétricos em soldagem a arco. Ele é composto de sensores que medem sinais de corrente, tensão, velocidade de arame e vazão de gás de soldagem e de um software para aquisição destes sinais (IMC- SOLDAGEM, 2005).



Figura 3.5- Sistema SAP 4.01 de aquisição de dados de soldagem (IMC- SOLDAGEM, 2005)

O sistema SAP V4.0 consiste de uma maleta para conexões com a máquina de solda, cilindro de gás de proteção e com um computador onde está instalado um software para manipulação dos dados adquiridos. Na Figura 3.6, pode-se visualizar o diagrama para conexão fonte soldagem e sistema de aquisição.

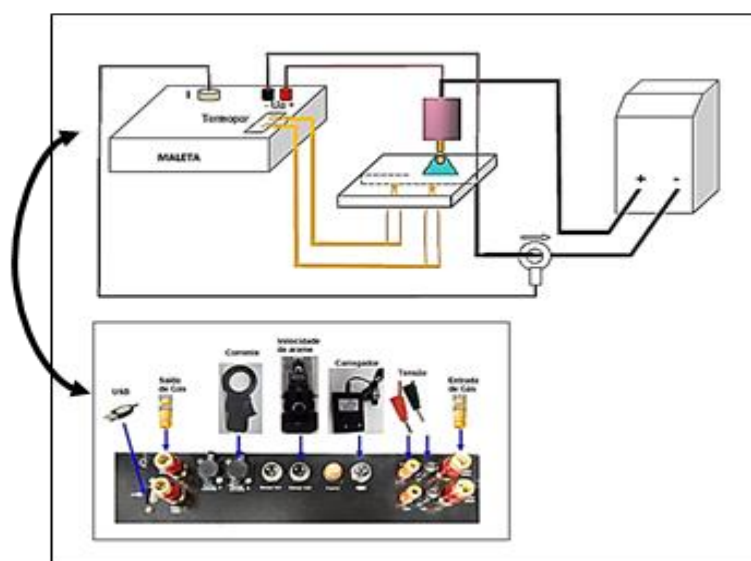


Figura 3.6 Diagrama conexão fonte soldagem e sistema de aquisição/ Painel de conexões da maleta do sistema SAP V4 (IMC- Soldagem, 2005)

5.4. METAL DE ADIÇÃO

Como metal de adição, foi utilizado o arame tubular tipo *flux-cored* MIX 38LFC, com diâmetro de 1,2 mm, fabricado pela MJV TUB. Este arame possui fluxo rutílico tipo “flux cored” onde quase toda sua totalidade é composto por minérios que lhe proporcionam excelente taxa de deposição aliada a elevada velocidade de soldagem, atendendo a norma internacional AWS A-5.22 E 308LT1-1/4. Deposita uma liga contendo 19%Cr-9%Ni com extra baixo teor de carbono para soldar aços inox do tipo AISI 201, 202, 301, 302, 303, 304, 304L, 305, 308 e 308L; aços 1.4300, 1.4301, 1.4312 e 1.4371 ou ligas similares entre si ou não. Possui ótima resistência contra a corrosão intercrystalina por soluções oxidantes até 300°C e a formação de carepa até 800°C. Seu arco suave e estável facilita o manuseio

produzindo cordões homogêneos e uniformes, isentos de poros, trincas ou fissuras e com baixíssimo índice de respingos, pouquíssima escória.

Este arame é utilizado na fabricação ou reparação de peças e equipamentos nas indústrias farmacêutica, química, hospitalar, têxtil, alimentícia, papel e celulose; na recuperação ou fabricação de trituradores, moinhos, batedeiras, misturadores, autoclaves, filtros, bombas, válvulas, tubulações, tanques, vasos e recipientes para armazenamento de bebidas e diversos outros produtos; na produção de exaustores, secadores, evaporadores, trocadores de calor, torres de resfriamento; fabricação de cozinhas e lavanderias industriais. As composições químicas e propriedades mecânicas dos materiais e consumíveis utilizados, segundo o fabricante, estão dispostas na Tabela 3.3. Como gás de proteção o fabricante recomenda utilizar para este arame o gás CO_2 100% ou a mistura Ar + 25% CO_2 .

Tabela 3.3- Composição química e propriedades mecânicas do arame tubular (fonte: MJV TUB, 2021)

Composição Química/Propriedades Mecânicas								
C	Si	Mn	Cr	Ni	L.E. (M/mm ²)	I (J)	A (%)	LRT (M/mm ²)
0,04	0,6	0,5	18-21	9-11	320	70	35	570

5.5. GÁS DE PROTEÇÃO

A escolha do gás de proteção obedeceu a recomendação do fabricante e também o menor teor de CO_2 presente. Desta forma através de testes, a escolha recaiu sobre a mistura C25 (75%Ar + 25% CO_2), por apresentar o cordão de solda com melhores aspectos geométricos. Estimou-se a vazão para o gás de 14 l/min. Este modelo de seleção, seguiu os mesmos parâmetros adotados por Corrêa (2009) em sua pesquisa utilizando aço inoxidável 304, onde o pesquisador realizou uma série de testes, inclusive com 100% CO_2 e constatou que a porcentagem C25 seria a mais ideal para o seu trabalho.

5.6. SELEÇÃO DOS PARÂMETROS DE SOLDAGEM

Para a determinação dos parâmetros de soldagem, seguiu-se de forma parcial os modelos adotados pelos trabalhos de Batista (2011) e Gomes (2010). Com o objetivo de encontrar condições de equilíbrio para as variáveis de soldagem, uma vez que as circunstâncias, as variáveis e o fabricante do metal de base e de adição seriam diferentes em relação ao dos pesquisadores citados acima, foram realizados vários testes de simples deposição.

Para a análise das características geométricas e produtivas dos cordões de solda, adotou-se como variáveis de influência os seguintes parâmetros:

- Energia de Soldagem (Es)
- Polaridade do arco
- Tecimento

Para a tensão de soldagem, o fabricante da fonte DIGIPlus A7, recomenda uma tensão usando o arame-eletrodo ER 316 L SI (aço inox) entre 35 -38 V porém, como a pesquisa está direcionada para o metal de adição *flux-cored* MIX 38LFC, decidiu-se como base seguir os padrões de parâmetros recomendados pela empresa MVJ, fabricante do arame tubular. Dessa forma, seguindo esta linha e de acordo com os testes preliminares realizados (Anexo 1), adotou um intervalo de trabalho entre 25- 30 Volt. Na tabela 3.4 pode-se encontrar de maneira geral todos os parâmetros constantes e variáveis que foram adotados no curso dos procedimentos de soldagem.

Tabela 3.4- Parâmetros fixos e variáveis para os experimentos de simples deposição

PARÂMETROS DE TRABALHO CONTANTES	
- Ângulo da tocha: 90°	- Vazão de Gás: 15 l/min
- Posição: Plana	- Velocidade de Balanço: 50 mm/min
- Tipo de Gás: C25	- Ângulo de balanço: 70°
- DBCP: 15 mm	- Velocidade de alimentação: 6 mm/min
- Polaridade: Inversa	- Tipo de Corrente: Contínua (CC)

VARIÁVEIS DE ANÁLISE
Energia de soldagem (J)
Velocidade de soldagem (mm/s)
Polaridade
Tecimento

5.7. EXECUÇÃO DOS ENSAIOS

A soldagem foi desenvolvida na bancada automatizada conforme a Figura 3.2 e relatadas no tópico 4, com o processo FCAW-G, na posição plana, com o bico da tocha e a chapa formando um ângulo de 90°. Para o DBCP, Seguiu-se a recomendação do fabricante dos arames tubulares, sendo esta distância aproximadamente de 15 mm.

Para facilitar o número de ensaios e a desenvoltura do operador, fabricaram-se corpos de provas nas dimensões de 100 x 150 x 10 mm, conforme a figura 3.8. Em seguida, para a execução do procedimento de soldagem de simples deposição, realizou-se inicialmente a limpeza dos os corpos de provas e a sua identificação.

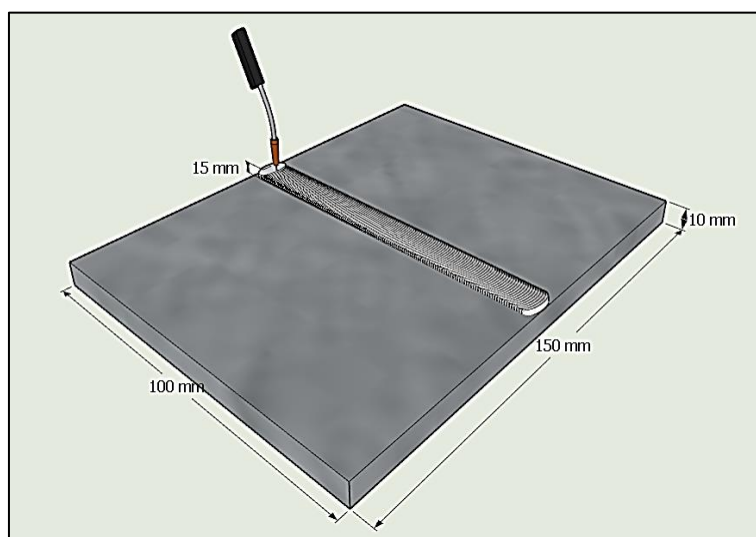


Figura 3.7- Representação dos corpos de provas recortados para a execução dos cordões de solda

A princípio foi tomado como referência os parâmetros de soldagem utilizados por LIMA (2008), e posteriormente os valores foram ajustados para uma condição mais estável possível para os tecimento do estudo. A figura 3.8 demonstra a forma dos tecimentos aplicados no trabalho

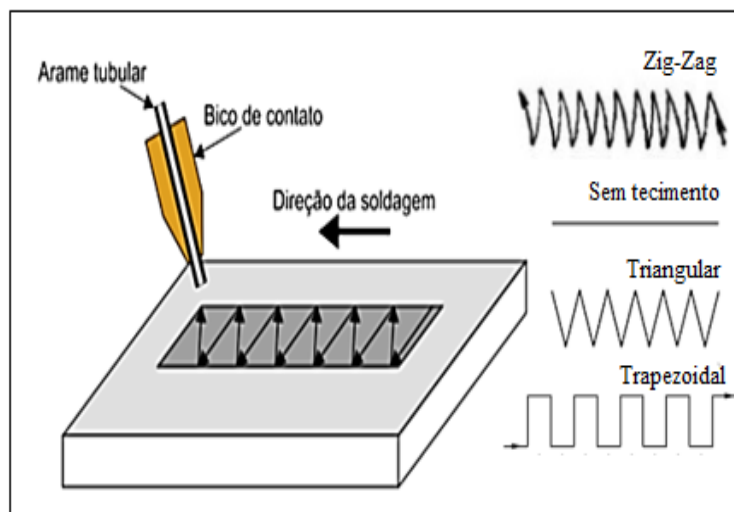


Figura 3.8- Esquema ilustrativo dos tecimentos aplicados no estudo (Autor)

5.8. POLARIDADE

Para analisar as variações geométricas dos cordões de solda com a mudança da polaridade foi proposto durante a pesquisa, testes aleatórios, variando condições como velocidade de soldagem, tecimento, tensão, velocidade de alimentação e DBCP. Marinho e Braga (2005) estudaram o processo de soldagem MIG CC^- e conseguiram perceber que a altura do reforço teve aumento significativo, porém a largura manteve-se regular, sendo maior para o polo positivo. Já para Machado (2009), um fator importante percebido durante os testes de soldagem over-lap foi a baixa penetração com a polaridade negativa, um ponto muito positivo para esse tipo de soldagem, uma vez que este parâmetro influencia diretamente na diluição do cordão de solda

Para a soldagem com o arame *flux-cored* MIX 38LFC (308L) o fabricante MJV TUB recomenda que todos os processos sejam trabalhados com polaridade positiva (CC^+), padrão este já testado e aprovado pela empresa. Porém como um dos objetivos do trabalho é encontrar potencialidades na mudança de polos no processo de soldagem, efetuaram-se 6 testes para polaridade inversa e 6 testes para polaridade direta.

O uso da polaridade invertida (CC^-) foi testada inicialmente como proposta de encontrar soluções semelhantes aos de Marinho e Braga (2005), que constataram grande influência da polaridade negativa sobre todas as variáveis de resposta (Reforço, Largura, Penetração e Diluição). De acordo com os testes não foi possível desenvolver nenhum cordão de solda em perfeito estado, todas as condições testadas apresentaram defeitos de má formação do cordão

de solda, inviabilizando o seu uso para o processo de revestimento com o consumível aplicado. Dessa forma, decidiu-se utilizar o padrão recomendado pelo fabricante, no caso polaridade positiva.

As Figuras 4.1 e 4.2 apresentam cordões soldados com polaridade inversa (CC+) e com polaridade direta (CC-), respectivamente.



Figura 4.2: Polaridade direta (CC-)

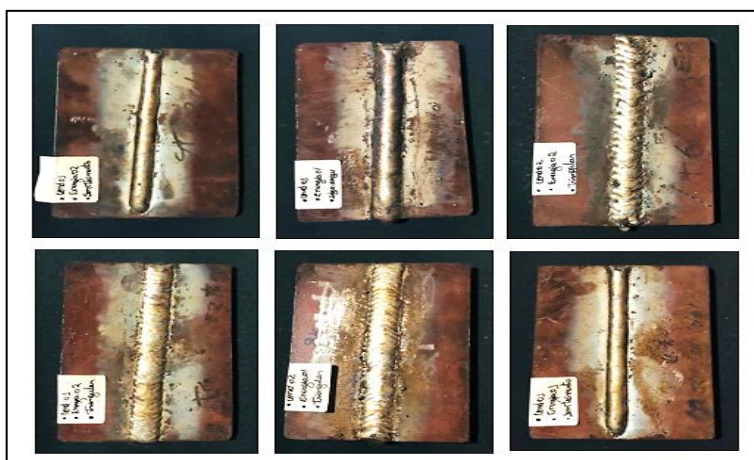


Figura 4.1- Cordões de solda com polaridade inversa (CC⁺).

5.9. METODOLOGIA PARA TRATAMENTO DOS DADOS

Na pesquisa científica geralmente formula-se uma ou mais hipóteses e procura-se verifica-las por um conjunto de operações. O planejamento experimental é fundamental para as hipóteses formuladas, a qual é feita por métodos de análises estatísticas. Dessa forma,

percebe-se a relação íntima que existe entre o planejamento de experimentos e a análise dos resultados.

Portanto, após a realização dos testes preliminares, para identificar os intervalos de trabalho entre as variáveis de soldagem, executou-se ensaios definitivos, com o objetivo de analisar cada variável, resultando em um total de 16 ensaios, divididos em 4 condições distintas. A Tabela 3.5 apresenta o delineamento experimental obtido. A mesma tabela apresenta para cada teste preestabelecido os correspondentes valores de energia de soldagem (E), calculados conforme equação 3.1.

Tabela 3.5- Delineamento experimental

Condições	Parâmetros				
	Tecimento	U (V)	I (A)	VS (mm/s)	ES (kJ)
1	TP	24,8	130	0,83	3,9
	ST	24,8	130	0,83	3884,3
	TG	24,8	130	0,83	3884,3
	ZZ	24,8	130	0,83	3884,3
2	TP	24,8	110	1	2728
	ST	24,8	110	1	2728
	TG	24,8	110	1	2728
	ZZ	24,8	110	1	2728
3	TP	25,8	130	0,83	4041
	ST	25,8	130	0,83	4041
	TG	25,8	130	0,83	4041
	ZZ	25,8	130	0,83	4041
4	TP	24,8	110	0,83	3286,7
	ST	24,8	110	0,83	3286,7
	TG	24,8	110	0,83	3286,7
	ZZ	24,8	110	0,83	3286,7

$$E_s = \frac{60 . I . U}{1.000 . V_s} \quad (3.1)$$

Sendo: E_s - Energia nominal de soldagem (kJ/mm);

I – Corrente de soldagem (A);

U - Tensão de soldagem (V);

V_s – Velocidade de soldagem (mm/min).

Para a análise estatística, o objetivo principal é identificar as hipóteses formuladas no início da pesquisa científica, não se apresentando todos os aspectos relevantes envolvidos no método estatístico, ou seja, nesta primeira etapa foi realizada apenas as soldagens de simples deposição utilizando as combinações significativas para o trabalho, para posteriormente analisar as condições geométricas e produtivas dos cordões de solda.

Portanto, visando realizar a análise estatística dos resultados colhidos nos ensaios, foi realizada 1 soldagem para cada combinação de parâmetros. Em seguida os corpos de prova foram seccionados em 5 partes conforme a norma Técnica ASTM IX para realização de especificações de soldagem e facilitação da análise estatística.

5.10. METODOLOGIA PARA ANÁLISE DE QUALIDADE SUPERFICIAL DOS CORDÕES DE SOLDA

As características de qualidade foram avaliadas seguindo como critério o índice de convexidade, uma vez que trabalha-se diretamente com o formato geométrico ideal para a sobreposição dos cordões de solda para revestimentos metálicos.

As amostras obtidas, após corte transversal, foram analisadas utilizando um paquímetro para as medições, um calibrador universal e o software imagem J. O índice de convexidade (IC) foi calculado da forma como indicou Paiva, (PAIVA, et. al., 2010) com as medidas da altura do reforço (R) e da largura do cordão (L) utilizando a seguinte equação: Índice de convexidade:

$$IC = \frac{R}{L} * (100\%) \quad (3.2)$$

Onde L é a largura e R é a altura do reforço do cordão.

5.11. METODOLOGIA PARA ANÁLISE GEOMÉTRICA DOS CORDÕES DE SOLDA

Antes de iniciar o processo metalográfico, os corpos de prova soldados foram cortados com disco abrasivo em 5 partes, conforme apresentado na figura 3.9, sendo esse número objeto quantitativo para melhorar os resultados dos experimentos.

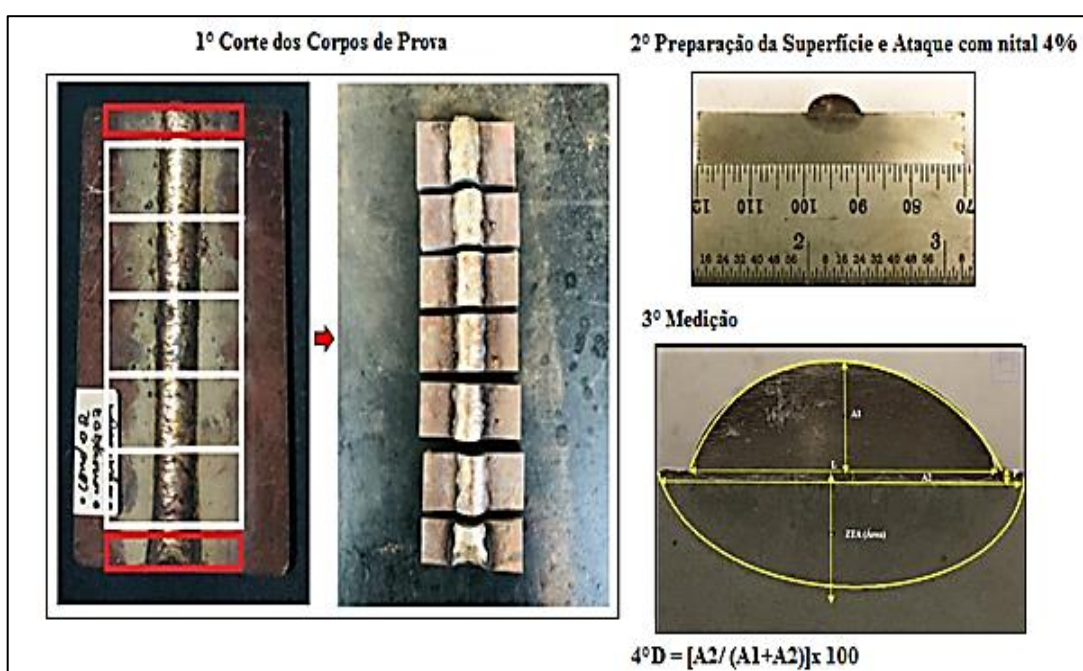


Figura 3.9- Representação do procedimento experimental para o processo de análise geométrica (Fonte:Autor)

Nas amostras, cada superfície transversal ao cordão de solda foi lixada de forma manual, usando a sequência de granulometria 180, 220, 320, 400, girando 90° a cada mudança. Após a superfície já plana, foi realizado o acabamento, utilizando as lixas respectivamente 500, 600 e 1000. E finalmente as amostras foram polidas com Alumina (Al_2O_3) de 1µm Para esta etapa utilizou-se o equipamento Lixadeira Politriz, conforme ilustra a figura 3.10.



Figura 3.10- Lixadeira politriz

Para o Ataque químico, o reagente utilizado na análise de perfil foi o Nital (4 ml HNO_3 + 96ml Álcool Etílico), com tempo de ataque de segundos a minutos. nesta etapa utilizou-se 30 segundos. A aplicação deste reagente é recomendada pela norma ASME IX para os aços carbono em geral.

Para finalizar, os corpos de prova foram levados ao microscópio óptico para iniciar as medições dos ensaios de macrografia. Nesta etapa várias fotografias da geometria do cordão de solda, com diversos aumentos, foram realizadas para posterior análise da influência dos parâmetros de soldagem em cada condição especificada,

5.11.1. PROCESSO DE MEDIÇÃO DA GEOMETRIA DO CORDÃO DE SOLDADA

Segundo Kobayashi (1987), a geometria do cordão de solda pode ser definida pela penetração da solda (P), altura do reforço da solda (R), largura do cordão de solda (L), área de penetração (A_f), área de reforço (A_d) e área total ($A_d + A_f$), Conforme esquema mostrado na Figura 3.15.

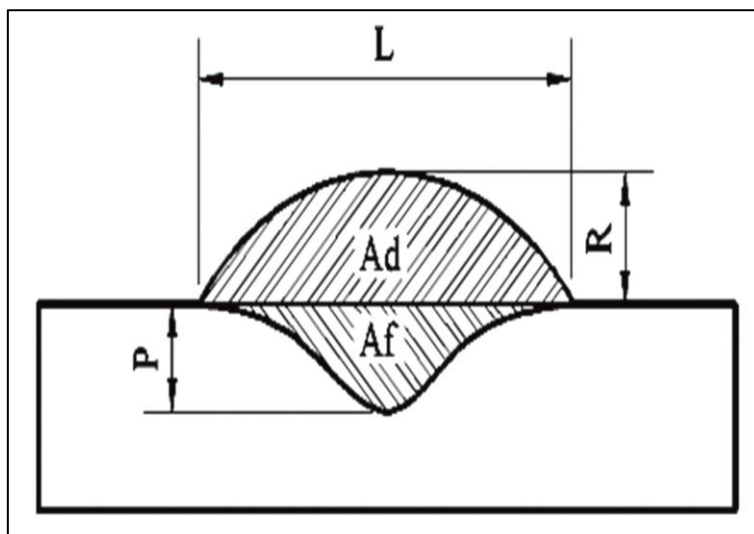


Figura 3.15 – Representação da área da seção transversal do cordão de solda (PESSOA, 2010)

As medições das respostas geométricas foram realizadas em quatro pontos distintos dos cordões, desprezando o início e o fim do processo, com a finalidade de obter a média das respostas. Os corpos de prova foram cortados e suas seções transversais foram devidamente preparadas, atacadas com nital 4% e fotografadas. A Figura 3.16 mostra as seções transversais de dois corpos de prova após os procedimentos de corte, preparação e ataque. Com a ajuda do software analisador de imagens Imagem J, as dimensões do cordão foram mensuradas, obtendo-se a largura, penetração, reforço, área da ZTA e reforço. O percentual de diluição foi então calculado dividindo-se a área de penetração pela área total, conforme a equação 3.5.

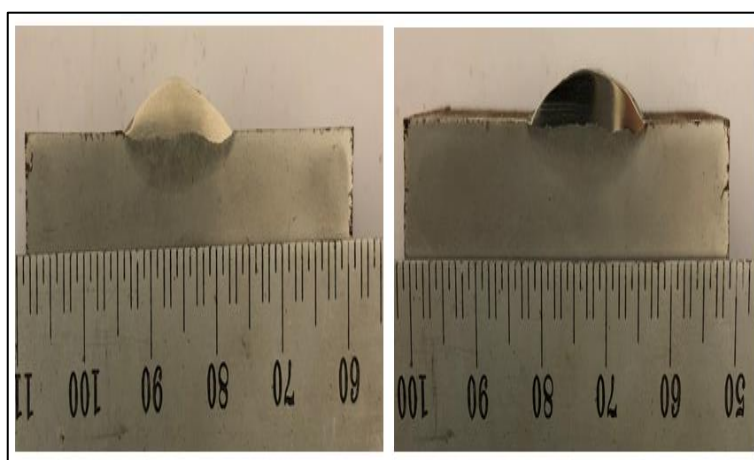


Figura 3.16- Seção transversal do cordão de solda

$$D = \frac{A_f}{A_d + A_f} \times 100 (\%) \quad (3.5)$$

. Para auxiliar e comparar as medições também foi utilizado um calibre de solda destinado a medições de geométricas para cordões de solda, figura 3.19.



Figura 3.17- Exemplo ilustrativo da medição do reforço do cordão de solda

Após a medição de todas as respostas de interesse, estas foram reunidas para compor a matriz experimental das tabelas 4.1 e 4.10, utilizada como fonte de dados para a estimação dos modelos matemáticos.

CAPITULO IV

6. RESULTADOS E DISCUSSÕES

Neste capítulo são apresentados e discutidos os resultados atingidos no procedimento experimental dos ensaios finais executados e analisados dentro da estrutura lógica apresentada no Capítulo IV. As variáveis de respostas mostradas como resultados para a soldagem de revestimento são: geometria da junta soldada e qualidade do cordão de solda. As análises dos resultados foram abordadas em 2 agrupamentos, no primeiro caso foi abordado a análise geométrica dos cordões de solda. Já na segunda parte, são abordadas as análises dos parâmetros de qualidade do cordão de solda.

6.1. EFEITO DA VARIAÇÃO DA POLARIDADE

De acordo com os resultados do trabalho, nenhuma amostra com a polaridade negativa (CC-) conseguiu obter um cordão de solda com qualidade; é possível verificar a presença de cordões irregulares e com defeitos, o que impossibilita as suas aplicações em soldagem.

Durante os testes realizados com CC⁻ era notável que o arco elétrico apresentava uma grande instabilidade, mesmo variando todos os parâmetros elétricos e operacionais de forma proporcionais. Outro ponto percebido no ensaio foi a demora para formação e depósito da gota metálica. Este fato era influenciado principalmente pelo aumento da velocidade de soldagem, era possível observar a extinção momentânea do arco. Ainda sobre a formação das gotas metálicas, outro fator complicador foi o tecimento, este acabou gerando cordões de solda de pior qualidade, isso justamente por conta do tempo para gerar a formação da gota de metal fundido. E por último, uma outra observação feita nos ensaios foi a questão da molhabilidade do metal de solda. Em todos os ensaios percebeu-se que o metal de solda não se espalhava durante o curso de soldagem, gerando bolhas com uma alta concentração de metal de adição e sem penetração.

Existe várias hipóteses para que esse fenômeno aconteça, o primeiro é simplesmente pelo método de fabricação, a qual o fabricante desenvolveu o arame apenas para aplicações tradicionais, com o uso da polaridade inversa. Uma segunda hipótese, pode ser levado em consideração que as condições de uso para a polaridade negativa exigiam maiores taxas de fusão e deposição do material de adição, porém este processo exigia alto refino, ou podemos dizer, um balanceamento adequado entre TD e TF, além de um controle da estabilidade do arco, para evitar aquecimento excessivo da tocha e consequentemente danificação do equipamento.

6.2. RESULTADOS DOS PARÂMETROS GEOMÉTRICOS E DE DILUIÇÃO DOS CORDÕES DE SOLDA

A Tabela 4.1 apresenta as condições de soldagem e os resultados obtidos com os testes de simples deposição para as respostas correspondentes a penetração (P), largura do cordão (L), Reforço (R), diluição (D) e área da zona termicamente afetada pelo calor (ZTA). Além destas respostas, a mesma tabela apresenta os valores de energia de soldagem (E) relativos aos parâmetros de soldagem para cada condição de soldagem e os seguintes tipos de tecimento: TP: Trapezoidal; ST: Sem tecimento; TG: Triangular; ZZ: Zig-Zag.

Tabela 4.1 - Geometria dos cordões de solda e ZTA para cada condição analisada.

Condição	Parâmetros		Cordão de Solda				ZTA		
	Tecimento	Es (kJ)	P (mm)	R (mm)	L (mm)	D (%)	P (mm)	L (mm)	Área (cm ²)
1	TP	3,9	0,883	2,296	17,81	62,5	3,561	18,719	0,385
	ST	3,9	0,503	3,470	9,34	17,0	3,471	11,918	0,320
	TG	3,9	0,791	2,435	19,06	48,1	3,566	19,669	0,366
	ZZ	3,9	0,267	5,041	15,33	5,6	5,985	18,313	0,519
2	TP	2,7	0,68	2,584	17,97	35,7	3,875	19,060	0,386
	ST	2,7	0,297	3,265	10,41	10,0	3,493	12,968	0,353
	TG	2,7	0,579	2,618	18,27	28,4	4,205	19,734	0,527
	ZZ	2,7	0,282	3,755	18,15	8,1	6,289	19,774	0,736
3	TP	4,0	0,657	2,177	16,35	43,2	3,131	17,607	0,431
	ST	4,0	0,344	3,790	10,70	10,0	4,294	13,162	0,389
	TG	4,0	0,847	2,268	18,11	59,6	3,660	19,289	0,494
	ZZ	4,0	0,353	5,453	14,42	6,9	6,535	18,259	0,787
4	TP	3,3	0,601	2,373	16,49	33,9	3,093	17,627	0,357
	ST	3,3	0,383	3,385	9,45	12,8	3,297	11,181	0,224
	TG	3,3	0,635	2,630	16,55	31,8	3,016	17,505	0,318
	ZZ	3,3	0,563	3,585	18,08	18,6	6,340	20,415	0,886

As Figura 4.3 e 4.4 mostram os cordões das soldas obtidos para cada condição (soldagem de simples deposição); cada número corresponde a uma condição de acordo com a Tabela 4.1.

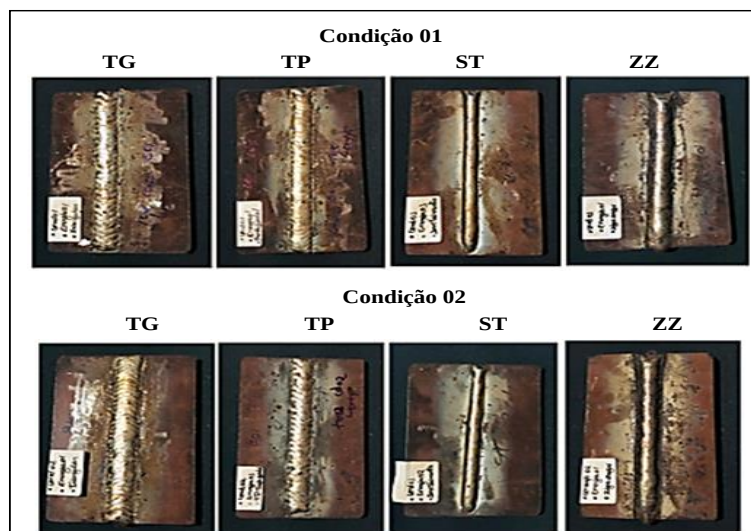


Figura 4.3 - Cordões de solda de simples deposição para as condições 01 e 02 (Fonte: Autor)

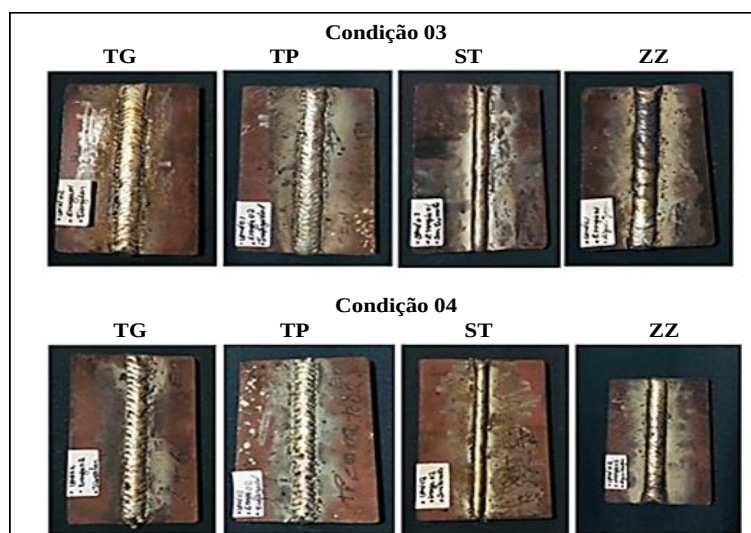


Figura 4.4 - Cordões de solda de simples deposição para as condições 03 e 04 (Fonte: Autor)

6.3. ENSAIOS MACROGRÁFICOS

A seguir, são apresentados os resultados dos ensaios macrográficos deferidos na pesquisa. Para cada tipo de tecimento, trabalhou-se com 4 tipos diferentes de energia

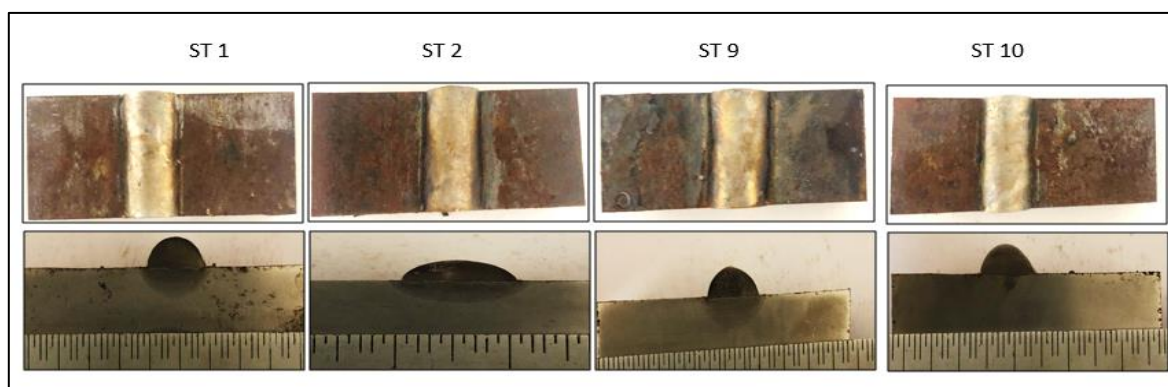


Figura 3.11-Ensaio macrográfico sem movimento de tecimento para 4 energias distintas

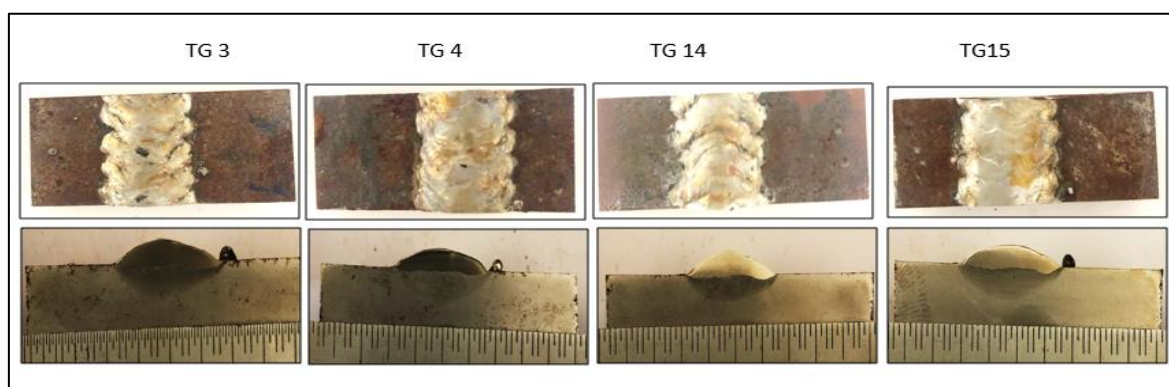


Figura 3.12- Ensaio macrográfico com tecimento triangular para 4 energias distintas

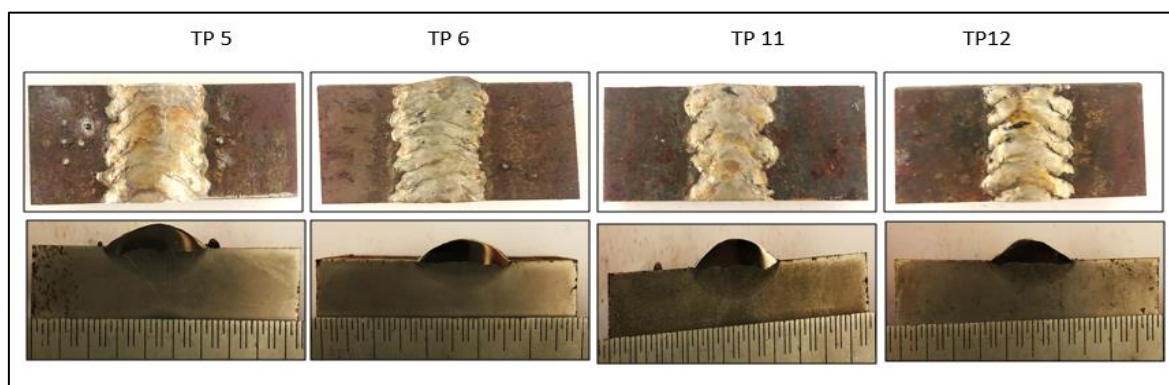


Figura 3.13- Ensaio macrográfico com tecimento trapezoidal para 4 energias distintas

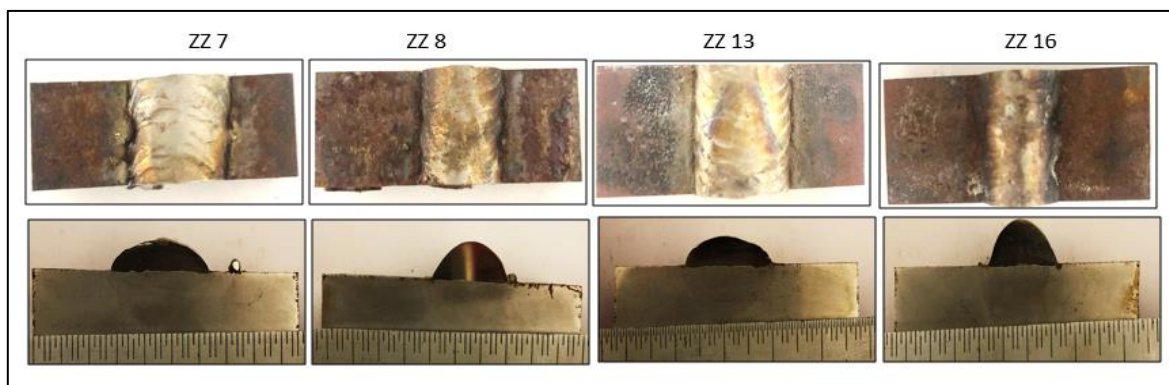


Figura 3.14- Ensaio macrográfico com tecimento zig-zag para 4 energias distintas

6.4. ANÁLISE GEOMÉTRICA DA LARGURA CORDÕES DE SOLDA

O software *MINITAB*® foi empregado para a construção das superfícies de resposta relacionando os parâmetros estudados com as respostas da geometria, produtividade e qualidade dos revestimentos. Entretanto, tais superfícies serão discutidas em maiores detalhes posteriormente junto com a análise das interações entre os parâmetros. Já para os gráficos de barras, foi adotado o software Excel, os quais serão abordados a seguir.

Na medição do perfil geométrico da soldagem de revestimento, o objetivo é obter a maior largura e reforço, para que a soldagem seja realizada com o menor número de passes, fazendo com que se tenham resultados de economia de tempo, de custo e da quantidade de metal de adição. Um dos maiores desafios da soldagem de revestimento é o ajuste adequado dos parâmetros utilizados no processo, devido a sua grande quantidade de variáveis, e de suas interações nos resultados para que o material depositado tenha a melhor geometria desejada.

Partindo destas premissas, deve-se obter o maior rendimento e largura possível, maximizando a deposição e diminuindo o custo operacional na soldagem de revestimento, e que o material depositado tenha a melhor geometria desejada.

O gráfico apresentado na Figura 4.5 mostra os resultados para a largura do cordão para as diferentes energias e para os 4 tipos diferentes de tecimentos.

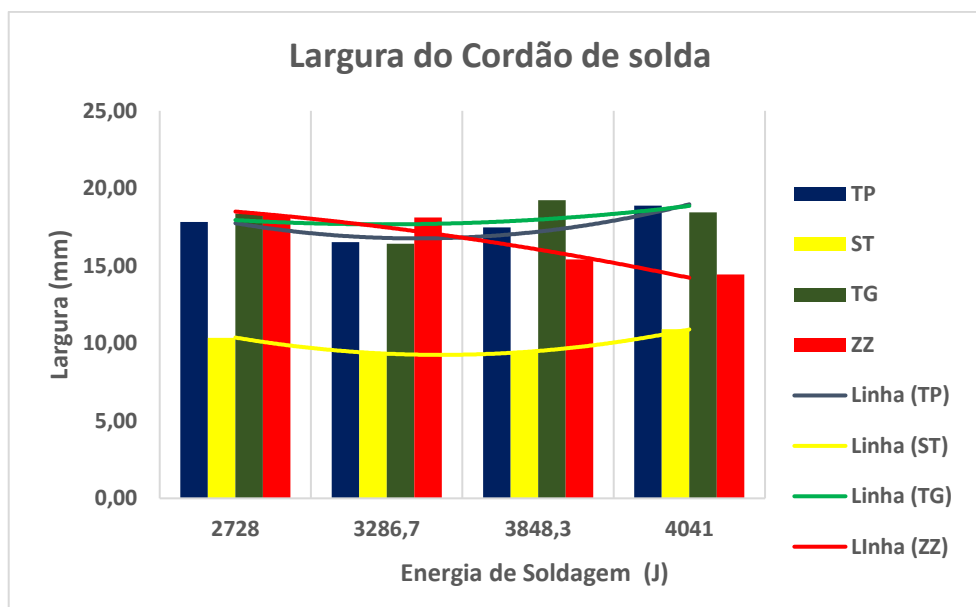


Figura 4.5 - Largura dos cordões de solda

A análise da Figura 4.5 mostra que a largura apresenta nos 4 tipos de tecimentos (trapezoidal, sem tecimento, triangular e zig-zag), linhas de tendência distintas entre si em razão da variação da energia de soldagem, com variações significativas na largura do cordão de solda. Dentre os tecimentos, destacam-se as oscilações triangular e trapezoidal, apresentando os maiores valores para a largura, proporcionais a energia de soldagem. Sendo eles 19,06 e 17,81 mm respectivamente. A potência do arco é responsável pelo crescimento largura do cordão de solda. Kobayashi (1987 Apud Corrêa, 2006) salienta que o diâmetro do cone do arco aumenta em conjunto com a potência do arco, resultando cordões mais largos. A largura mínima, 9,34 mm, foi observada para a condição sem a utilização do tecimento e a máxima, 19,06 mm, utilizando tecimento triangular, ambos para mesma energia de 3884,3 J. Portanto, observa-se que não só o crescimento da energia, mas a mudança na oscilação da tocha durante os ensaios fornece uma variação positiva na largura cordão de solda, podendo em algumas situações, descartar o uso de um dos parâmetros.

Esses resultados também foram encontrados por Gomes (2012) que utilizaram o processo de arame tubular e aço inoxidável 316L com planejamento composto central com resultados de largura entre 7,99 e 15,05 mm. Seeraj (2013) depositou o aço inoxidável 308L pelo processo MIG, e obtiveram largura entre 6,028 e 10,514 mm. Vale destacar que entre os tecimentos, apenas um apresentou curva de tendência com perspectiva negativa, o tecimento Zig-Zag. Esta anormalidade pode ser explicada pelo movimento de tecimento em

conjunto com o aumento da potência do arco, na qual a poça de fusão pode ter sido contraída pelo movimento de balanço da tocha durante os ensaios.

6.4.1. ANÁLISE GEOMÉTRICA DA PENETRAÇÃO DOS CORDÕES DE SOLDA DE SOLDA

Os resultados para a penetração, Figura 4.6, mostram que a energia de soldagem influencia diretamente nas suas dimensões, porém, alguns movimentos de oscilação também podem influenciar na penetração do metal de solda. Em soldagem de revestimento busca-se cordões de solda com a menor penetração possível, mas que atendam aos requisitos de projeto da junta soldada. Observa-se na Figura 4.6 que dentre os movimentos de tecimentos, o tecimento triangular e o tecimento trapezoidal apresentaram maiores níveis de penetrações; esses valores podem ser visualizados com maior precisão nas condições 01 ($E_s = 2,7$ kJ) e 03 ($E_s = 3,9$ kJ). Entretanto, exceto os tecimentos triangular e zigzag, todos apresentam curva de tendência instável, sem proporcionalidade com o aumento da energia de soldagem, fato explicado pela redução da concentração da tocha em uma mesma posição. Os menores valores para a penetração são fornecidos pelo tecimento zigzag.

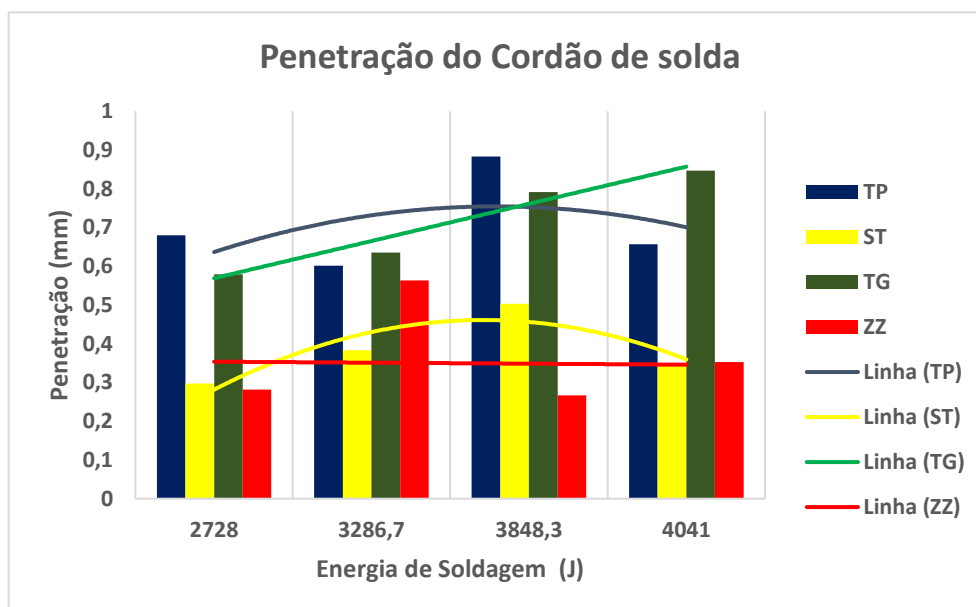


Figura 4.6 - Penetração dos cordões de solda

6.4.2. ANÁLISE GEOMÉTRICA DO REFORÇO DOS CORDÕES DE SOLDA

A Figura 4.7 apresenta os resultados do reforço dos cordões de solda para as diferentes energias de soldagem e tipos de tecimentos analisados.

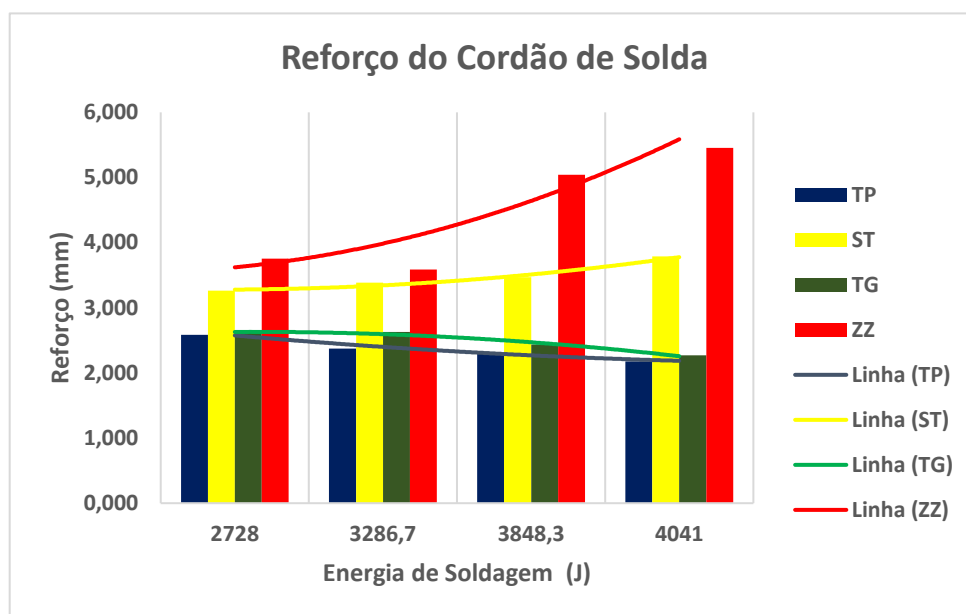


Figura 4.7 - Reforço dos cordões de solda (Autor)

Observa-se no gráfico da Figura 4.7 o comportamento do reforço dos cordões de solda, num primeiro momento, percebe-se redução do reforço para 2 tipos de tecimentos, o tecimento triangular e o trapezoidal. Independente da energia de soldagem, os movimentos de oscilação são grandes influenciadores na produtividade e largura do cordão de solda, dessa forma, quando um cordão de solda se apresenta com largura excessiva em função do tecimento, conclui-se que os mesmos irão apresentar baixo reforço de soldagem. Observa-se nas Figuras 4.6 e 4.7 que os tecimentos que apresentaram maiores larguras foram os mesmos que apresentaram menores reforços de solda. O reforço do cordão aumenta à medida que o arco diminui, a área adicionada de solda aumenta, e as propriedades como tensão superficial e viscosidade aumentam. Outra prova pode ser comparando os fenômenos para o cordão de solda sem tecimento. Percebe-se que o mesmo no gráfico 4.5 apresenta as menores larguras, fruto da ausência de tecimento, logo, para a finalidade a qual destina-se o trabalho este procedimento não é adequado. Na figura 4.7 os cordões de solda sem tecimento se

mantém praticamente constante, sendo influenciado muito pouco pela energia de soldagem, variando os entre valores mínimos de 3,2 a 3,7. Para o tecimento ZigZag ocorre uma anormalidade já esperada durante os ensaios. Os próprios movimentos curtos entre os passes de solda, facilitam o enchimento excessivo do cordão de solda em um pequeno espaço, deixando-o com um reforço excessivo, com acúmulo de metal de adição, variando entre de 3,5 a 5,4 mm. Desta forma, inicialmente, para os parâmetros esperados, percebe-se que uma grande vantagem do tecimento zigzag, uma vez que suas larguras, apesar de apresentar um curva de tendência decrescente, ainda apresentam valores elevadores com baixos valores de energia de soldagem, não sendo necessário utilizar elevado valores de aporte térmico na aplicação do ensaio. Na condição 02, tabela 4, com a menor energia já é possível obter valores significativos para largura e reforço, respectivamente 18,15 e 3,75 mm.

6.4.3. ANÁLISE GEOMÉTRICA DA DILUIÇÃO DOS CORDÕES DE SOLDA

Na soldagem de revestimento deseja-se uma área de penetração pequena, reforço maior possível e ainda a menor diluição possível. A diluição é a razão entre a área de penetração com da área total da solda (penetração e reforço). De acordo com Garcia (2011), o valor da diluição é um fator de bastante relevância devido este ser um fator que determina a composição química tanto da zona fundida quanto da região do reforço, afetando diretamente nas propriedades tribológicas e dureza do material.

A Figura 4.8 mostra os valores da diluição em função do tipo de tecimento e em função da energia de soldagem. Percebe-se novamente que o tecimento em zig-zag apresenta uma tendência em reduzir seu percentual à medida que se aumenta a energia de soldagem, fato este também observados nos cordões de solda sem tecimento. Observa-se ainda que, apesar das variações das áreas, a diluição nas amostras repete o mesmo comportamento, onde as amostras com tecimento (trapezoidal e triangular) apresentam uma maior diluição em relação as amostras sem oscilação da tocha, como já era esperado, uma vez que os reforços para as amostras que não apresentam oscilação se exibem como termos positivos para cordões de solda de revestimento, de acordo com a figura 4.7.

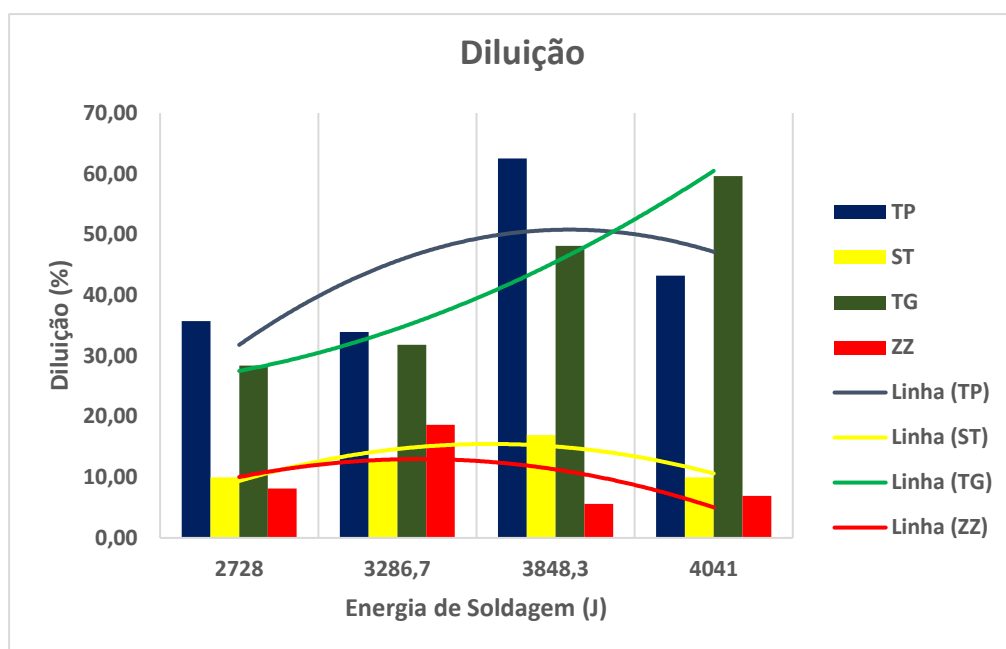


Figura 4.8 - Diluição dos cordões de solda (Autor)

6.4.4. ANÁLISE DIMENSIONAL DA ZTA

Uma das principais preocupações nos processos de soldagem é a influência do aporte térmico sobre as juntas soldadas. No processo de revestimento é interessante conhecer a influência dessa característica uma vez que o metal de adição servirá de cobertura para uma superfície metálica, e que esta possivelmente estará sujeita a esforços mecânicos. O aporte térmico excessivo pode comprometer os componentes mecânicos e todo o processo de revestimento perder sua devida importância. Dessa forma, obter uma minimização da área da ZTA é muito importante para o controle de qualidade do processo. A Figura 4.9 apresenta os resultados das dimensões da ZTA para todas as condições analisadas. Observa-se na figura que o aumento da energia de soldagem em todos os movimentos de oscilação da tocha apresenta uma linha de tendência crescente, ou seja, ocorre um aumento progressivo das áreas da ZTA. Entre os tecimentos mais afetados, destaca-se o tecimento zig-zag, apresentando uma área máxima de $0,888 \text{ cm}^2$. Apesar da sua importância para os processos de revestimentos no que diz respeito aos parâmetros geométricos, o tecimento zig-zag apresenta uma extensa área afetada pelo calor, o que implica a utilização de ensaios metalúrgicos para manter o controle e previsão da vida útil do material.

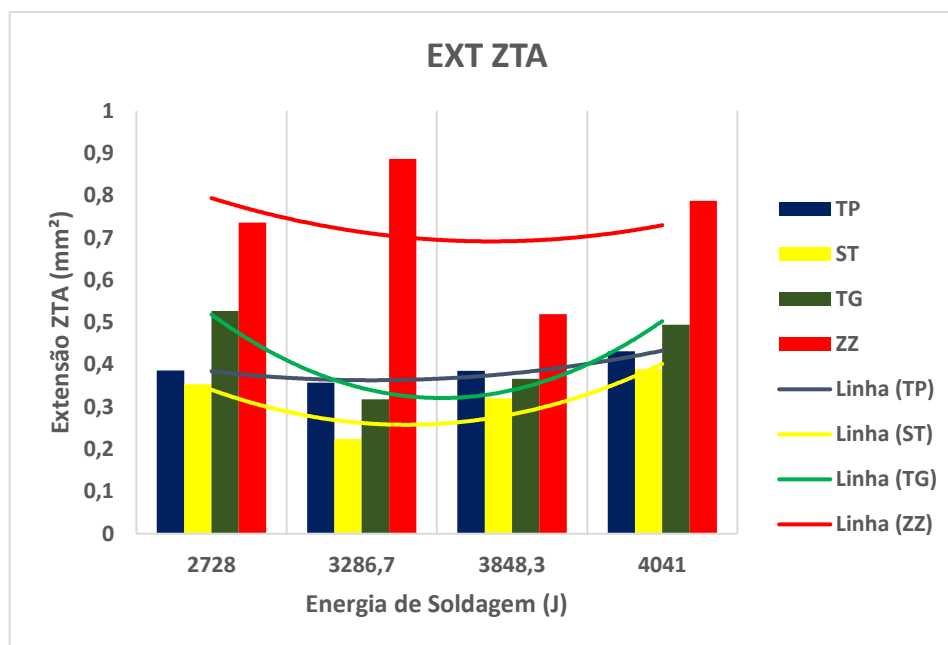


Figura 4.9 – Extensão da ZTA

6.5. ANÁLISE DO ÍNDICE DE CONVEXIDADE DOS CORDÕES DE SOLDA

O índice de convexidade do cordão está relacionado com a alimentação do arame e o comprimento do arco. Esta resposta tem uma grande influência nas propriedades mecânicas e possíveis falhas no aspecto visual do cordão, como reforço excessivo. Como parâmetro de aceitação, sugerem que a convexidade do cordão deva se situar entre 20 e 30% (SILVA, 2014). O gráfico 4.8, figura 4.12, demonstra a variação do tecimento e da energia em função do índice de convexidade. Dessa forma, podemos observar que os maiores índices de convexidade correspondem aos tecimentos zig-zag e linear, como já era esperado pelo trabalho. Quando o cordão não tem tecimento, o metal de adição é depositado em uma pequena região, inviabilizando o escoamento para as laterais do material. No tecimento zig-zag já era esperado essas características, uma vez que os reforços dos seus cordões de solda foram os maiores da pesquisa, deixando claro um aumento significativo na convexidade do cordão de solda.

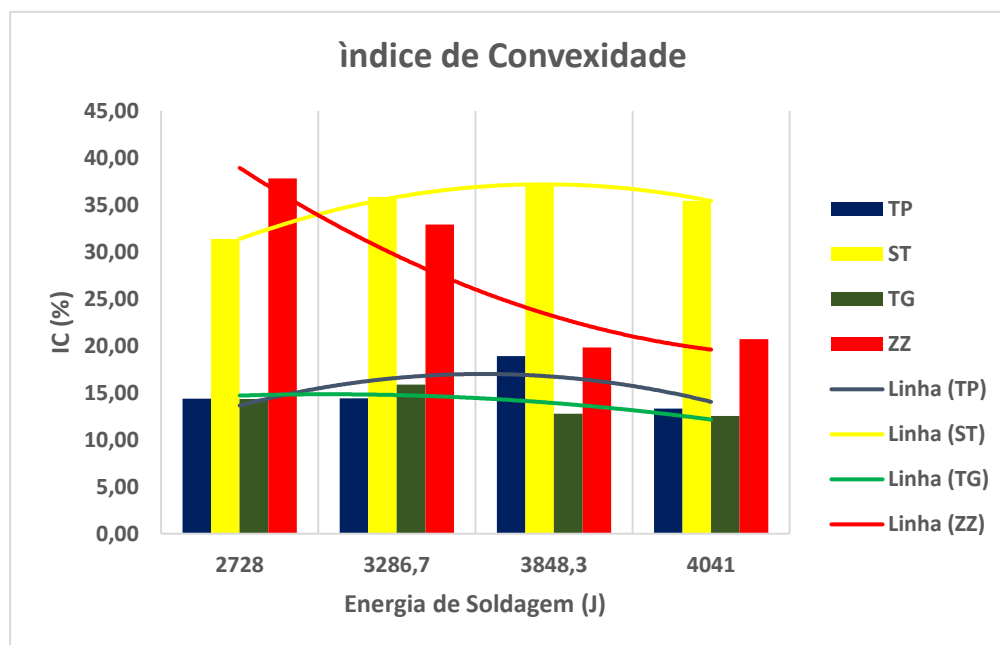


Figura 4.10- Índice de Convexidade

6.6. ANÁLISE DOS EFEITOS DAS INTERAÇÕES ENTRE OS PARÂMETROS

De acordo com dados da tabela 4.1, diversas interações entre os parâmetros estudados se comportaram como fatores significativos. Isto significa que o efeito conjunto desses parâmetros influencia de forma significativa os resultados do processo. Sendo assim, a análise sobre tais interações foi realizada através das superfícies de resposta.

6.6.1. EFEITOS DAS INTERAÇÕES SOBRE A GEOMETRIA, PRODUTIVIDADE E QUALIDADE DOS CORDÃO DE REVESTIMENTO.

Como o estudo apresenta 4 tecimentos, dividiu-se as análises em 4 grupos. Na primeira parte será analisado as interações com o tecimento linear ou sem tecimento.

- **SEM TECIMENTO**

As Figura 4.11 **B** apresentam o efeito conjunto Tensão, penetração e largura do cordão. Embora a os gráficos de barras já tenham mostrado que ambos os parâmetros são influentes sobre a energia de soldagem, da qual depende a tensão e a corrente, observa-se através da Figura 4.11 **B** que a interação entre eles também é significativa. Sendo assim, o aumento da tensão faz com que a largura aumente consideravelmente, entretanto o aumento da tensão não provoca o mesmo efeito na penetração, sendo esse parâmetro elétrico não significativo para a resposta de penetração. Já para as Fig 4.11 **E** e **G**, A largura apresenta aumento proporcional ao valor da energia, assim como a extensão da zona afetada pelo calor. A penetração tem aumento na Fig 4.11 **G** com aumento proporcional a variação positiva da energia de soldagem. Já na Fig 4.11 **A**, temos a relação da largura com a corrente e a velocidade de soldagem.

Dessa forma, quando se aumenta a corrente e reduz a velocidade de soldagem para 0,83 mm/s, podemos perceber que ocorre um aumento significativo da largura, chegando ao valor máximo de 10,7 mm. A figura 4.11 **C** estuda a interação da energia com a diluição e a penetração. Neste caso percebe que o aumento da energia proporciona um aumento da diluição e conseqüentemente um aumento da penetração. Porém, no último caso, quando a energia apresenta o seu maior valor, ocorrer uma redução drástica da diluição, este fenômeno ocorreu por conta do aumento da tensão, que aumentou o tamanho do arco elétrico, proporcionando um aumento significativo do reforço.

A figura 4.11 **D** mostra a relação da corrente em função do reforço e da penetração. É notável que o aumento da corrente proporciona aumento da penetração e do reforço proporcionalmente. Seguindo a mesma analogia, A Fig 4.11 **F** mostra que a variação positiva da energia aumenta também o reforço e de maneira proporcional o índice de convexidade.

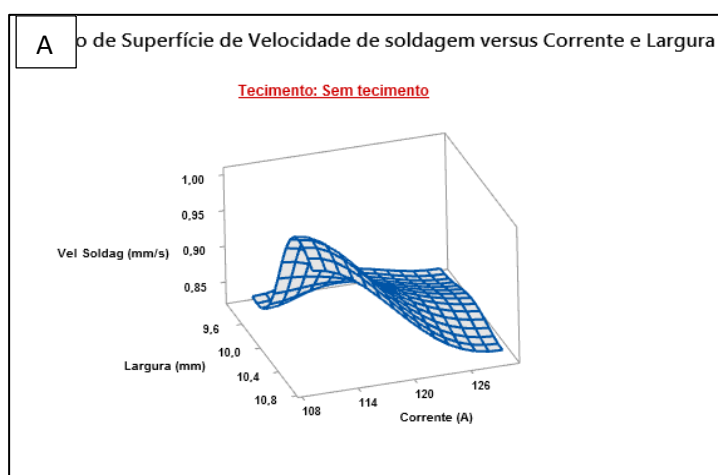


Figura 4.1a1- Gráficos de superfícies para o movimento de tecimento linear

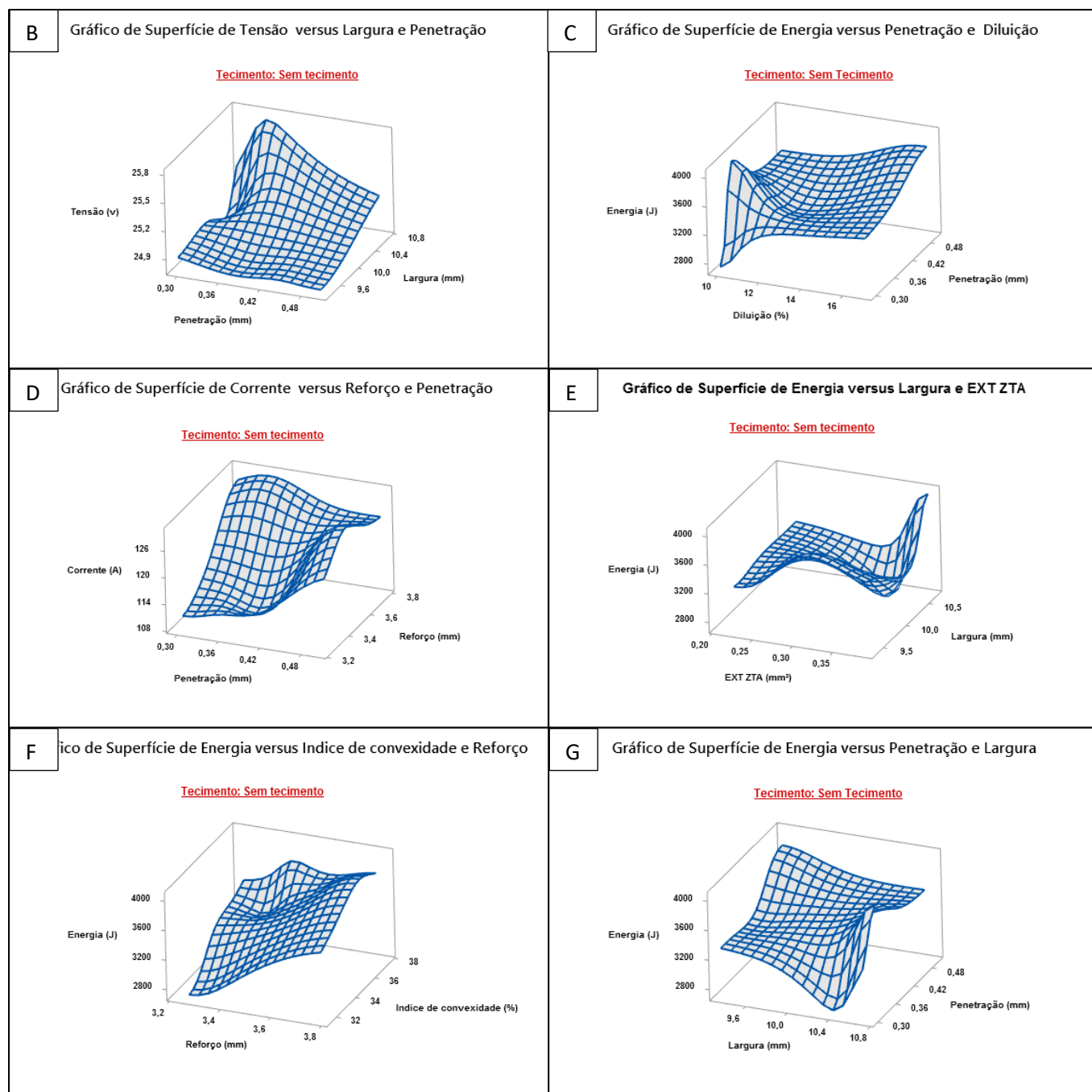


Figura 4.11b- Gráficos de superfícies para o movimento de tecimento linear

• TECIMENTO TRAPEZOIDAL

As figuras 4.12 **B, C, G e H**, mostram a variação da largura, penetração e extensão da ZTA para os parâmetros elétricos utilizados no trabalho. Na figura **B**, a tensão mostra-se

como parâmetro de pouca influência na largura do cordão de solda, apresentando valores entre os intervalos 16-17 mm. Assim como a penetração, a qual se mantém com valores próximos a 0,7mm. Semelhante ao item anterior, A largura, a penetração e a Ext ZTA na figura **E e G** se mantém aproximadamente constante com a variação da energia de soldagem. Para a energia de soldagem 2728J temos valores de 17,9 mm, 0,38 cm² e 0,68 mm para largura, Ext ZTA e penetração respectivamente, já para a maior energia, 4040J, estes valores são 16,35 mm, 0,43 cm² e 0,657 mm. Por último, o item o gráfico **A** mostra também que a largura não tem grande influência em função da velocidade de soldagem, onde seus valores encontram-se dentro do intervalo 16,354 -17,972 mm, a variação da velocidade não apresenta valores crescentes para a largura. O gráfico **C**, mostra a relação da energia com os valores de penetração e diluição.

Para o caso da diluição, podemos perceber que existe variações nítidas nos resultado. O valor da diluição é reduzido para maiores valores de energia de soldagem, porém, quando se apresenta um crescimento da penetração do cordão de solda, esta variável aumenta significativamente, isso ocorre pelo aumento da tensão de soldagem e pelo aumento do reforço cujo os gráficos **D e F**, exemplifica. Nos cordões de maiores reforços, tais como 2,58 mm, a diluição tem um crescimento positivo, chegando a valores de 35,7 %.

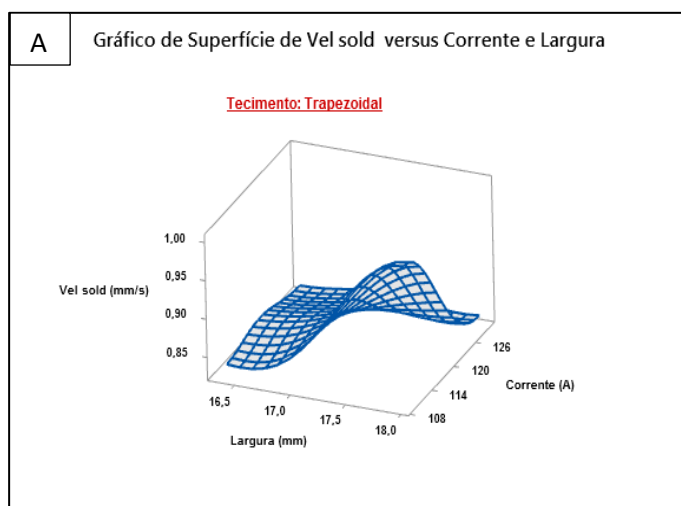


Figura 4.12a- Gráficos de superfícies para o movimento de tecimento Trapezoidal

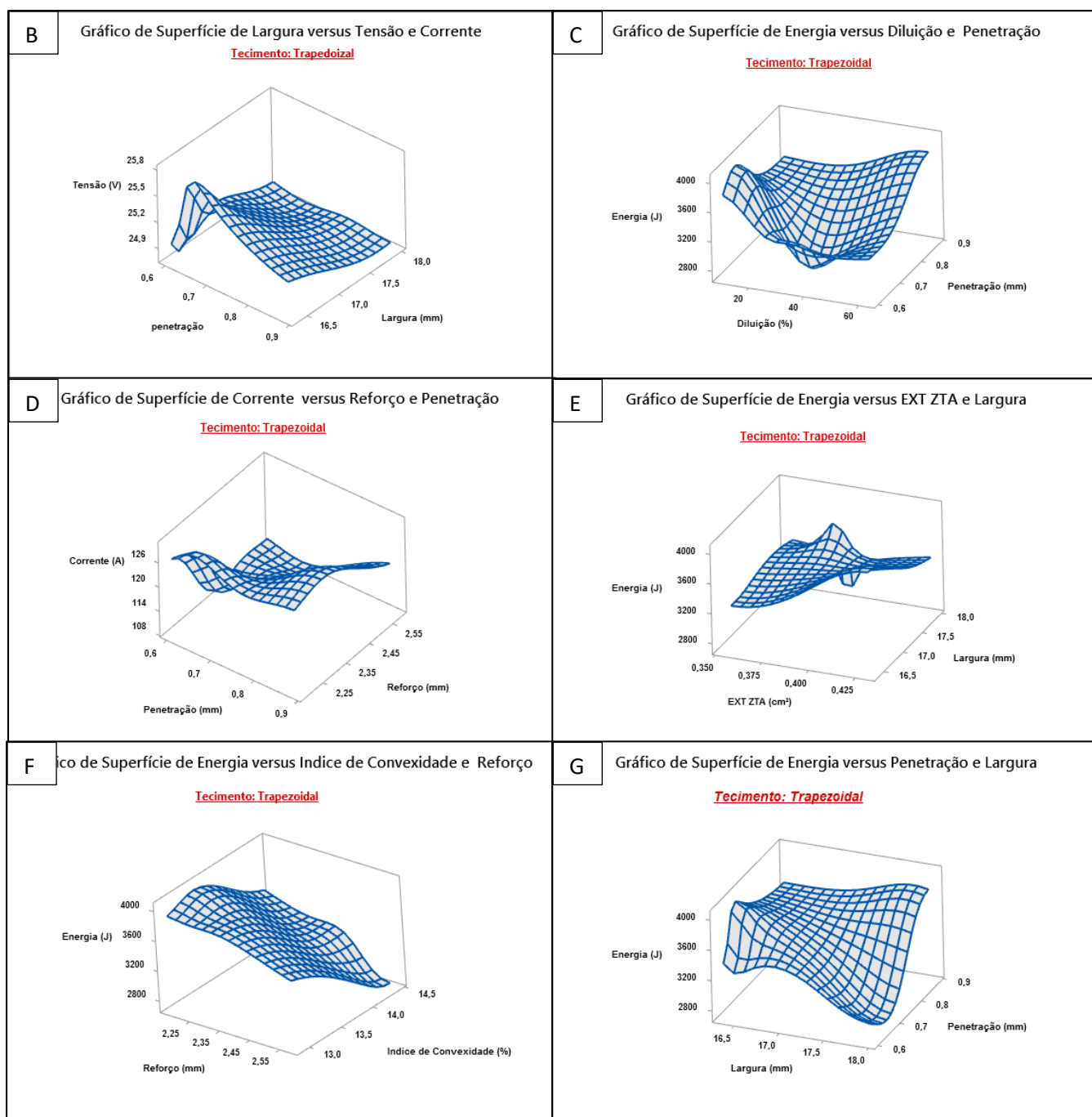


Figura 4.12b- Gráficos de superfícies para o movimento de tecimento Trapezoidal

• TECIMENTO TRIANGULAR

O tecimento triangular apresenta bom índice de significância para aos parâmetros geométricos: largura, penetração e diluição. Todos os parâmetros apresentam estas características na energia 02, a menor energia utilizada nos ensaios. Iniciando pelas variáveis largura e penetração, podemos destacar 4 gráficos, são eles: **B, D, E e H, Figura**

4.13 . Na Primeira análise, **gráfico B**, podemos perceber uma proporcionalidade gerada pela tensão elétrica. Quando o valor da tensão aumenta, os valores de largura e penetração aumentam proporcionalmente. Assim como no **gráfico D**, quando trabalhamos com um aumento da corrente, podemos perceber um aumento proporcional da penetração do cordão de solda. O **gráfico E e G** mostram também que o aumento da energia de soldagem proporciona um aumento da largura e da penetração, podendo obter valores entre 16-19 mm e 0,5 a 0,8 mm respectivamente. A Extensão a ZTA não foi um parâmetro significativo para este tecimento. O **gráfico A** mostra a relação da velocidade de soldagem, da corrente em função da largura de soldagem. Nesta análise, como já era esperado, quando reduzimos a velocidade de soldagem para 0,83 mm/s e aumentamos o valor da corrente para 130 A, conseguimos obter a maior largura possível para o cordão de solda, 19,061mm. A diluição, umas das variáveis mais importantes para as soldagens de revestimentos, apresenta também valor significativo para o trabalho, o **gráfico C** representa esta superfície de resposta. Nesta análise é possível perceber que a maior diluição, 59,6%, se concentra para a maior energia de soldagem 4040,96 J. Assim como a menor energia proporciona a menor diluição para o cordão de solda. Dessa forma, podemos perceber a ocorrência de uma proporcionalidade positiva para esta análise.

. Para a análise de qualidade do cordão de solda utilizamos o **gráfico F**, este parâmetro sofre influência estatisticamente. Dessa forma, a superfície mostra que o aumento da energia de soldagem reduz proporcionalmente o índice de convexidade. Vale destacar que o movimento de tecimento reduziu as dimensões do reforço, que é uma variável do índice de convexidade. Desta forma, estes cordões tendem a apresentar menores índices de convexidades.

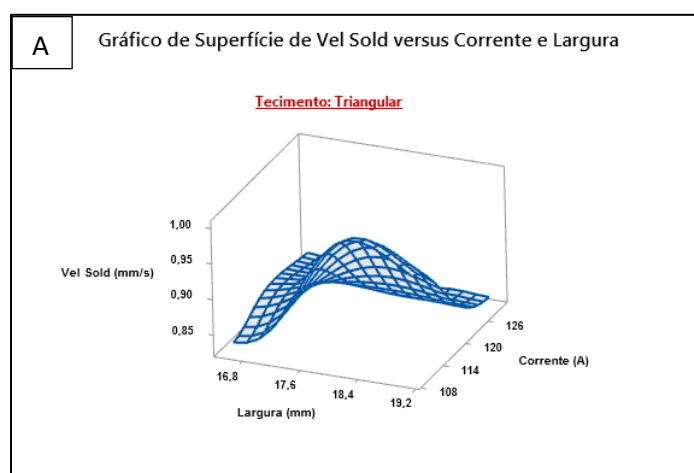


Figura 4.13a- Gráficos de superfícies para o movimento de tecimento triangular

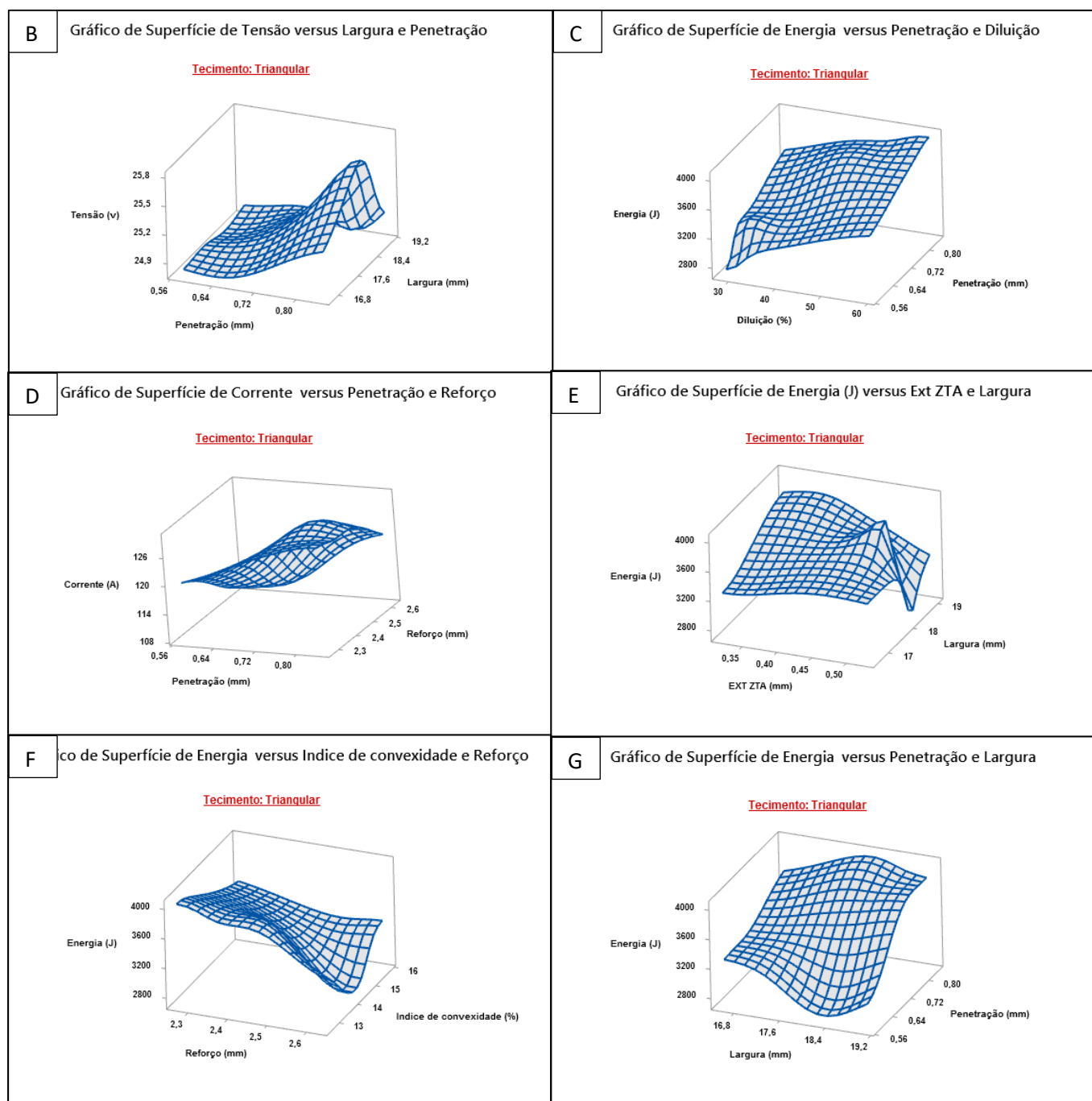


Figura 4.13b- Gráficos de superfícies para o movimento de tecimento Triangular

• TECIMENTO ZIG-ZAG

O tecimento zig-zag foi o tecimento com maior frequência de níveis de significância dentro do intervalo esperado pelo trabalho. Em função da largura o tecimento zigzag apresenta inicialmente um crescimento em relação do aumento da potência de soldagem, da corrente e da tensão, porém, logo em seguida tem um decrescimento nos seus valores,

passando de 18,1 para 14,4 mm. Esta mesma variação pode ser observada nos gráficos **A**, **B**, **E** e **G**, figura 4.14.

No gráfico de barras 4.1 também é possível verificar essa ocorrência. Como a análise está sendo feita com vários tipos de tecimentos, determinadas oscilações com a tocha, podem provocar várias reações distintas na geometria do cordão de solda. Uma explicação para este caso seria em função da velocidade e ângulo de balanço gerados durante a soldagem do cordão de solda. Quando se trabalha com tecimentos, o trator autowave disponibiliza uma velocidade de oscilação e vários ângulos de trabalho. No trabalho proposto, estas variáveis foram mantidas constantes. Dessa forma, uma velocidade média ou baixa de balanço, associada a um ângulo baixo de oscilação, podem levar ao aparecimento de revestimentos com larguras médias e reforços excessivos. A explicação para esta análise pode ser equiparada com os **gráficos D e F**. No **gráfico D**, o aumento da corrente elétrica provoca um aumento do reforço, assim como no **gráfico F**, onde o aumento da energia aumenta a deposição de material na região do revestimento, proporcionando crescimento do índice de convexidade. Dessa forma, podemos perceber que o movimento de oscilação pode interferir significativamente na geometria dos cordões de solda e confundir os resultados esperados pelos parâmetros elétricos. O **gráfico C** mostra a relação da energia com a diluição, nesta análise pode-se perceber um decréscimo da diluição quando aumentamos a energia de soldagem. No gráfico de barras 4.8 também é possível perceber esta variação.

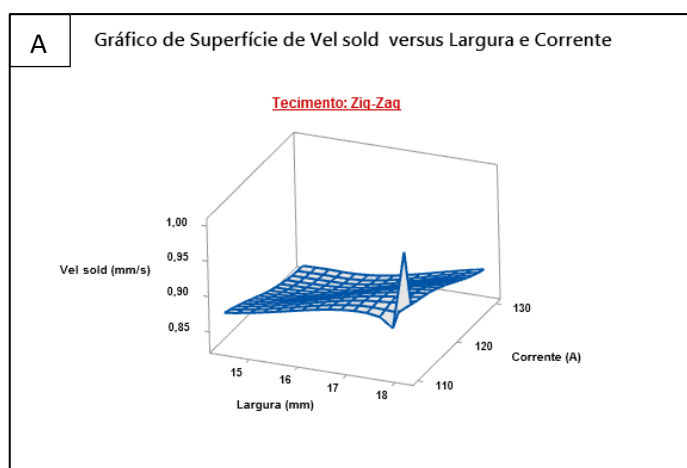


Figura 4.14a- Gráficos de superfícies para o movimento de tecimento Zig-Zag

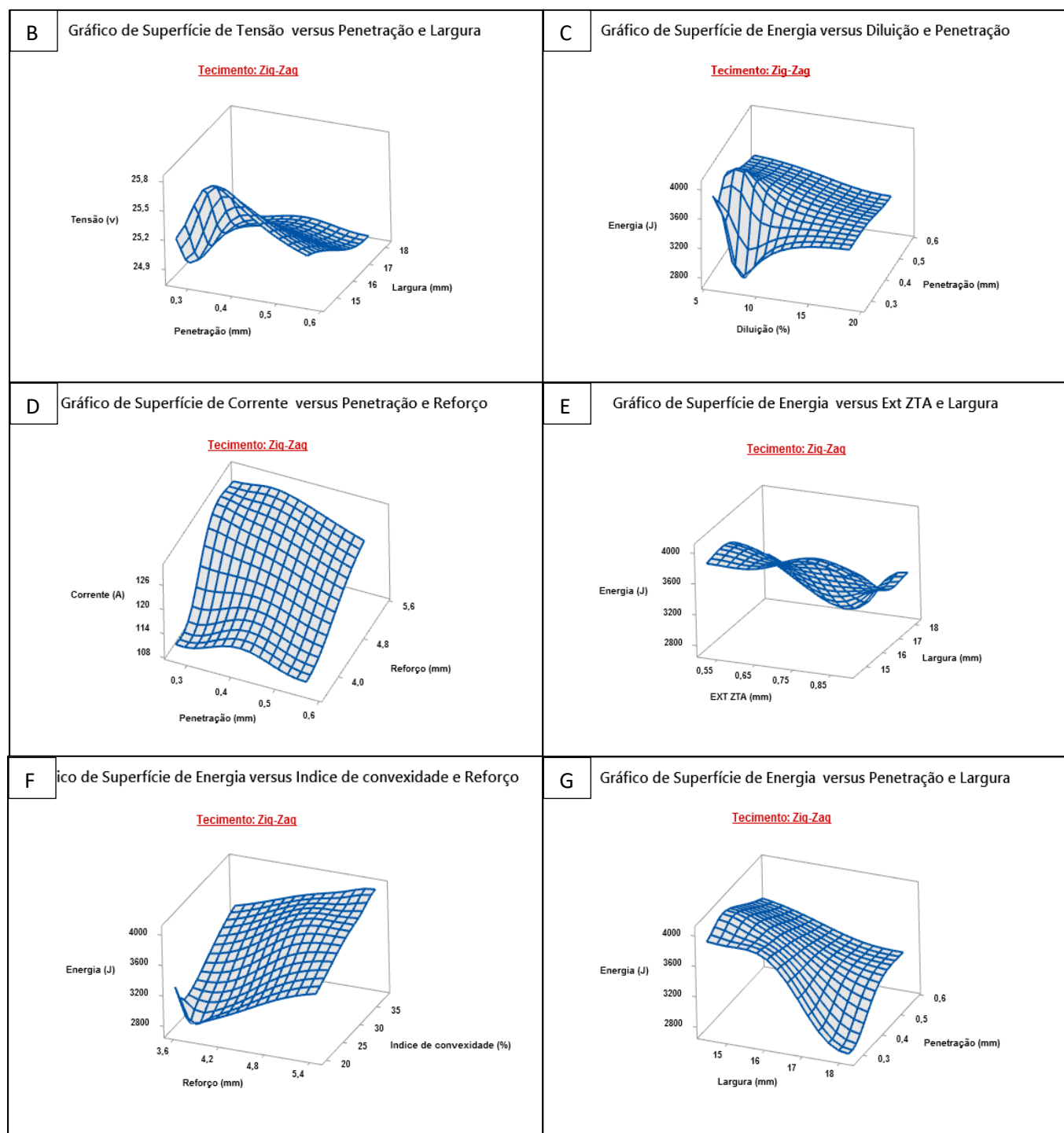


Figura 4.14b- Gráficos de superfícies para o movimento de tecimento Zig-Zag

CAPITULO V

7. CONCLUSÕES

Em função dos objetivos, resultados e das análises realizadas com o processo de soldagem FCAW-G, as quais foram aplicados para revestimentos metálicos em materiais de baixo carbono, este trabalho permitiu concluir que:

- A utilização da polaridade direta (CC^-) para soldagem de revestimento com arame tubular *flux-cored* MIX 38LFC apresenta características inerentes ao processo de soldagem, inviabilizando o seu uso pelo excesso de defeitos gerados no cordão de solda. Entretanto, a polaridade inversa (CC^+) apresenta resultados conclusivos para os ensaios, gerando geometrias de cordões de soldas adequadas para o uso de revestimentos.
- Maiores larguras dos cordões de soldas podem ser obtidas aumentando a energia de soldagem, porém esse fator não é dominante quando se trabalha com diferentes tecimentos, já que existem características internas de oscilação, tais como velocidade de balanço e ângulo de balanço que podem oferecer grande influência na deposição do material, um exemplo desse caso é o tecimento zig-zag, que apresenta resultados diferentes da literatura convencional sem o uso de tecimentos. Dessa forma, cada tipo de oscilação tem uma característica única e dependendo da análise que está sendo feita, pode trazer vantagens e desvantagens.
- Menores penetrações são alcançadas reduzindo-se a energia de soldagem.
- Para a diluição, menores percentuais são alcançados em baixa energia de soldagem. Para movimentos de tecimentos, onde a tocha exerce um papel fundamental nas laterais do cordão de solda, a diluição pode ser reduzida com maiores valores de energia, este fato ocorre porque o cordão de solda gera um reforço maior, e uma penetração menor por conta do intervalo de tempo reduzido que o arame tubular se concentra em cada região.

Já um maior reforço é obtido quando se aumenta a energia de soldagem. Porém esses valores podem ser reduzidos de acordo com o tipo de tecimento.

- A extensão da zona termicamente afetada pelo calor apresenta curva de tendência crescente para todos os tipos de tecimentos com a variação positiva da energia de soldagem, sendo a oscilação zig-zag com maior volume de área afetada.
- Para obtenção de menores índice de convexidades todos os tecimentos apresentaram curvas de tendência decrescente em função do aumento da energia de soldagem, exceto para o processo de revestimento sem tecimento (linear), para este movimento, o índice de convexidade apresentou valores crescentes com o aumento da energia de soldagem.
- Para a proposta da pesquisa, a qual esperava-se obter características adequadas para cordões de solda de revestimento, constatou-se como movimento de oscilação da tocha mais apropriado para este processo o tecimento ZIGZAG, em virtude das seguintes vantagens:
 - As menores penetrações entre os 4 tipos de tecimentos
 - As menores diluições entre os 4 tipos de tecimentos
 - Os maiores reforços entre os 4 tipos de tecimentos
 - Larguras dos cordões equilibradas, chegando ao valor máximo de 18,15 mm, sendo que a maior largura apresentada neste trabalho é de 19,05 mm, com o tecimento triangular.

8. RECOMENDAÇÕES PARA TRABALHOS FUTUROS

- Estudar a influência dos parâmetros do modo pulsado na soldagem na posição plana, com os mesmos consumíveis e metal base.
- Estudar a influência dos parâmetros de soldagem para revestimentos, com o uso de corrente alternada.
- Comparar o modo de transferência pulsado convencional o com o modo de corrente contínua.
- Avaliar a resistência ao impacto, análises mecânicas e metalúrgicas nas regiões afetadas pelo calor.
- Realizar ensaios de microdureza em duas posições, vertical e horizontal.
- Avaliar as mesmas condições de soldagem para juntas de topo.
- Realizar um estudo detalhado da estabilidade do arco elétrico no processo de soldagem com arame tubular.

9. REFERÊNCIAS

- “AC Pulse MIG Welding”, *Materials Transactions*, v. 50 (9), p. 2314-2317, 2009.
- “MIG Arc Welding with a Wire Melting Rate Change by Current Polarity Effect”, *Journal of Electrical Engineering and Technology*, v. 2 (3), p. 366-372, 2007.
- “Welding processes”, *Welding Handbook*, Eight Edition, Volume 2, American Welding Society. 1991. Chap.4
- ALVES, Celso Corrêa. *Uma contribuição ao Processo de Soldagem de Revestimento com Arame Tubular Pulsado de um aço CA6NM aplicando o método de Taguchi*. 2018. 120 f. Tese (Doutorado) - Curso de Doutorado da Faculdade de Engenharia Mecânica da Universidade Estadual de Campinas, Como Requisito Para Obtenção do Título de Doutor em Engenharia Mecânica., Universidade Estadual de Campinas, Campinas, 2018.
- AQUINO FILHO, Adérito de. *Estudo do comportamento mecânico de juntas de aço API 5L X80 soldadas com arames tubulares Undermatched e evenmatched*. 2011. 94 f. Tese (Doutorado) - Curso de Engenharia Mecânica, Universidade Federal do Pernambuco, Recife, 2011
- BATISTA, Valmir Rodrigues. “Efeito dos parâmetros de soldagem sobre a geometria e diluição de revestimentos de liga de níquel aplicados em aço API 5L Gr B”. *Revista Eletrônica de Materiais e Processos*, Campina Grande- Pb, v. 3, n. 6, p. 181-187, out. 2011.
- BRITES, Lucas. “Influência dos parâmetros de soldagem nas características geométricas e económicas de uma solda com arame tubular autoprottegido”. In: *Congresso de engenharias da UFSJ, 7., 2018, São João del Rei. COEN VII*. São João del Rei: Coen, 2018. p. 1-12.
- .
- COLAÇO, Fernando Henrique Gruber *et al.* “Influência da energia de soldagem no desgaste abrasivo de revestimentos duros aplicados pelo processo fcaw”. In: *CONEM 2012, 7.,*

- 2012, São Luis0-Ma. *Congresso nacional de engenharia mecânica*. São Luis: Abcm, 2012. p. 1-7.
- CORRÊA, Fábio Ricardo Torrano. *Efeito dos parâmetros de pulso sobre as características geométricas e desempenho da soldagem com arame tubular autoprotetido e corrente pulsada*. 2006. 129 f. Dissertação (Mestrado) - Curso de Pós Graduação Engenharia Mecânica, Universidade Estadual Paulista "Júlio de Mesquita Filho", Bauru – Sp, 2006.
- DIAS, A.O.; SILVA, E.M.; COSTA, S.C.; CORREA, E.O. “Aplicação da técnica de projeto e análise de experimento na soldagem do aço inoxidável AISI-304 com arame tubular”. *90 Simpósio de Mecânica Computacional*, 26 a 28 de maio de 2010, Universidade Federal de São João Del-Rei, Minas Gerais.
- FÁBIO L. C. M, FRANK L. P. Q, ALDERI P. F, CARLOS A. M. M E EDUARDO DE M. B “Influência da utilização da polaridade negativa sobre as características geométricas de soldas de revestimento”. *Congresso nacional de estudantes de engenharia mecânica*, 12, 2005, Ilha Solteira - Sp Abcm,. 2 p.
- FICHEL, I., DALLA, A., ROS, D. A.; FELIZARDO, I., VAZ, C. T., GONZÁLEZ, L. P.; PÉREZ, M. R.; PUCHOL, R. Q.; PESSOA, E. C. P., BRACARENSE, A. Q. “Desenvolvimento de Eletrodos Revestidos Impermeáveis”. In: CONSOLDA – ABS, 35., 2009, Piracicaba, Anais... Piracicaba: ABS, 2009.
- GARCIA, D. B. C. *Aplicação de revetimento duro utilizando o processo arame tubular com e sem adição de arame não energizado para diferentes tipos de consumíveis*. Uberlândia - MG: Dissertação de Mestrado, Programa de PósGraduação em Engenharia Mecânica, UFU, 2011.
- GOMES, J.H.F.; COSTA S.C.; PAIVA, A.P.; BALESTRASSI, P.P. “Mathematical Modeling of Weld Bead Geometry, Quality, and Productivity for Stainless Steel Claddings Deposited by FCAW”. *Journal of Materials Engineering and Performance*, v.21, n.9, p.1862-1872, 2012.
- GOMES, José Henrique de Freitas. *Análise e otimização da soldagem de revestimento de chapas de aço abnt 1020 com utilização de arame tubular inoxidável austenítico*. 2010. 136 f. Dissertação (Mestrado) - Curso de Engenharia de Produção, Universidade Federal de Itajubá, Itajubá, 2010.
- HSOLDAS. Catálogo geral. 2. ed. Blumenau-sc: Hsoldas, 2016. 20 p.
- JOAQUIM, Engº Roberto. “Processo de Soldagem por Arame Tubular”. *Infosolda*. São Paulo, p. 1-20. jun. 2020

- KANNAN, T. e MURUGAN, N. “Effect of flux cored arc welding process parameters on duplex stainless steel clad quality”. *Journal of Materials Processing Technology*, v. 176, n. 1-3, p. 230-239, 2006.
- Kim, T. J.; Lee, J. P.; Min, B. D.; Yoo, D. W.; Kim, C. U. “Characteristics of Pulse”, 2007
- LIMA, A. C. *Estudo da aplicação de revestimento duro por soldagem com arames tubulares quanto à resistência ao desgaste de facas picadoras de canade-açúcar*. Uberlândia - MG: Tese de doutorado, Universidade Federal de Uberlândia - UFU, 2008. 232 p.
- LUZ, Mauro Apolinário da. “Comparação da taxa de deposição e eficiência de deposição entre os consumíveis”. In: *Congresso latino-americano da construção metálica.*, 2014, São Paulo. Comparação da taxa de deposição e eficiência de deposição entre os consumíveis. São Paulo: Abcem, 2014. v. 8, p. 1-43
- MACHADO. L. G. (1997), *Soldagem e técnicas conexas*. Livro editado pelo autor. mai. 2009.
- MARQUES, P. V.; MODENESI, P. J.; BRACARENSE, A. Q. *Soldagem: fundamentos e tecnologia*. Belo Horizonte: UFMG, 2005. 362 p. Mecânica), Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis, 2009.
- MENDES, Rafael Bezerra Azevedo. *Efeito do tecimento triangular e trapezoidal sobre revestimentos aplicado com arames tubulares quanto à resistência ao desgaste abrasivo*. 2018. 121 f. Dissertação (Doutorado) - Curso de Programa de Pós-Graduação em Engenharia Mecânica (Ppgem), Ufrn, Natal, 2018.
- MIRANDA, E. C; SILVA, C. C; MOTTA, M. F; MIRANDA, Hélio .C. “Avaliação do Uso do Tecimento sobre o Nível de Diluição e Geometria do Cordão de Solda na Soldagem TIG com Alimentação Automática de Arame Frio”. *Soldagem e Inspeção*, São Paulo, v. 2, n. 20, p. 180-190, jun. 2015
- MODENESI, P. (2012). *Introdução à física do arco elétrico*. UFMG, Belo Horizonte, 44p., Janeiro 2012.
- MODENESI, P. J.; MARQUES, P. V. *Soldagem I: introdução aos processos de soldagem*. Belo Horizonte: UFMG, 2006. p. 12-14
- MONTGOMERY, D. C. *Design and Analysis of Experiments*. Wiley: New York, 2005.
- NASCIMENTO, A. S. ET. AL. (1998), “Procedimento Experimental para seleção de Parâmetros de Pulso para Soldagem com Arame tubular em Corrente Pulsada”, *Anais do COBEF, Congresso Brasileiro de Engenharia de Fabricação*, Uberlândia, ref 175, pp 855-865..

- PAIVA, et al. (Jan/Mar de 2010). “Otimização do Processo de Soldagem FCAW Usando o Erro Quadrático Multivariado”. *soldagem & Inspeção*, 15(1), 31-40.
- PALANI, P. K. e MURUGAN, N. “Development of mathematical models for prediction of weld bead geometry in cladding by flux cored arc welding”. *International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, v. 30, n. 7-8, p. 669-676, 2006.
- PALANI, P. K. e MURUGAN, N. “Optimization of weld bead geometry for stainless steel claddings deposited by FCAW”. *Journal of Materials Processing Technology*, v. 190, n. 1-3, p. 291-299, 2007.
- PERALTA-ZAMORA, P.; MORAIS, J. L.; NAGATA, N. *Por que otimização multivariada?* Engenharia Sanitária e Ambiental. v.10, n.2, p.106-110, 2009.
- RIBEIRO, Rodrigo Andrade. *Caracterização de juntas de aço carbono revestidas com inconel 625 pelo processo tig automatizado e pela soldagem por explosão*. 2014. 114 f. Dissertação (Mestrado) - Curso de Engenharia de Materiais, Universidade Estadual do Norte Fluminense – Uenf, Campos dos Goytacazes, 2014.
- SHAHI, A. S. e PANDEY, S. “Prediction of dilution in GMA and UGMA stainless steel single layer cladding using response surface methodology”. *Science and Technology of Welding and Joining*, v. 11, n. 6, p. 634-640, 2008.
- SILVA CC, MIRANDA EC, MOTTA MF, MIRANDA HC, FARIAS JP. “Minimização de defeitos em revestimentos de superligas de níquel depositada pelo Processo TIG com alimentação de arame frio”. *Soldagem e Inspeção*. 2014;19(4):323-332.
- SILVA, José Hilton Ferreira da. *Proposta de um novo ensaio para avaliar a susceptibilidade de metais de solda ao fenômeno de trincas induzidas pelo hidrogênio em diferentes ambientes*. 2005. 182 f. Tese (Doutorado) - Curso de Engenharia Mecânica, Engenharia Térmica e Fluidos, Universidade Estadual de Campinas, Campinas, 2005.
- SILVA, M. M.; MACIE, T. M.; SANTOS, M. A.. “Efeito da energia de soldagem sobre a microestrutura de revestimentos AISI 317L depositados em aços ASTM A516 Gr 60 para aplicação no setor de petróleo e gás”. *Revista Eletrônica de Materiais e Processos*, Fortaleza, v. 2, n. 5, p. 54-60, jul. 2010.
- SKHABOVSKYI, I. ; KOVALENKO, O. ; REIS, R. P. ; SCOTTI, A. . “Utilização de MIG/MAG com Polaridade Variável com Técnica Switch-back para Revestimentos”. In: POSMEC, 2014, Uberlândia. Anais do POSMEC 2015 - *Simpósio do Programa de Pós-Graduação em Engenharia Mecânica*, 2014. p. 1-4

- SOLDAG. INSP. São Paulo: *Seleção de Parâmetros Através do Método Taguchi Para Soldagem de Revestimento Com Ligas de Níquel Pelo Processo Mig/mag*, v. 15, n. 4, 2010
- SOUZA, C. I. *Análise comparativa dos processos de soldagem GMAW e FCAW com transferência metálica por curto-circuito na posição horizontal*. Dissertação de Mestrado, Universidade Federal de Uberlândia, 2011.
- SOUZA, Edésio Edmur e Fabiano. *Avaliação metalúrgica da soldagem de revestimento com aço inoxidável austenítico sobre aço astm a-36*. 2016. 82 f. Monografia (Especialização) - Curso de Especialização em Soldagem, Engenharia Mecânica, Universidade Federal de Minas Gerais, Belo Horizonte, 2016.
- STARLING, Cícero Murta Diniz; MODENESI, Paulo José; BORBA, Tadeu Messias Donizete. “Caracterização do Cordão na Soldagem FCAW com um Arame Tubular Metal Cored”. *Soldagem e Inspeção*, São Paulo, v. 16, n. 3, p. 285-300, ago. 2011.
- TATAGIBA, Luiz Claudio Soares; GONÇALVES, Renata Barbosa; PARANHOS, Ronaldo. “Tendências no desenvolvimento de gases de proteção utilizados na soldagem MIG/MAG”. *Soldagem e Inspeção*, São Paulo, v. 3, n. 17, p. 218-228, set. 2012.
- WAINER, E.; BRANDI, S. D.; MELLO, F. D. H. *Soldagem: processos e metalurgia*. São Paulo: Edgard Blucher, 2004. p. 10-14.