

**UNIVERSIDADE FEDERAL DE ITAJUBÁ
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA MECÂNICA**

**ANÁLISE DAS INTERAÇÕES DAS VARIÁVEIS NO
PROCESSO GMAW DUPLO ARAME PARA AVALIAÇÃO DA
QUALIDADE DOS CORDÕES DE SOLDA**

Nancy Del Ducca Barbedo

Itajubá, Março, 2017.

UNIVERSIDADE FEDERAL DE ITAJUBÁ
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA MECÂNICA

Nancy Del Ducca Barbedo

**ANÁLISE DAS INTERAÇÕES DAS VARIÁVEIS NO
PROCESSO GMAW DUPLO ARAME PARA AVALIAÇÃO DA
QUALIDADE DOS CORDÕES DE SOLDA**

Tese submetida ao Programa de Pós
Graduação em Engenharia Mecânica como
parte dos requisitos para a obtenção do
Título de Doutora em Ciências em
Engenharia Mecânica.

Área de Concentração: Projeto e Fabricação

Orientador: Prof. Dr. Edmilson Otoni
Correa

Coorientador: Prof. Dr. Carlos Alberto
Carvalho Castro

Março de 2017

Itajubá

AGRADECIMENTOS

A Deus constante presença em minha vida.

À minha família, por todo o apoio e compreensão.

Ao meu orientador Edmilson Otoni Corrêa e ao meu coorientador Carlos Alberto Carvalho Castro, pelo suporte, amizade e paciência.

Aos técnicos Eduardo Pereira da Silva (CEFET – Varginha), Marcos Cirilo dos Santos (UNIFEI) e funcionários das respectivas Oficinas pela amizade, apoio e participação durante o trabalho.

Ao Prof. Dr. José Henrique de Freitas Gomes, pela contribuição na parte estatística.

Ao CEFET – MG – Campus VIII – Varginha, pela realização das soldas.

A Esab, pelo fornecimento dos arames.

A Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior (CAPES) através do programa de bolsas, pelo apoio financeiro.

Resumo

Neste trabalho foi realizado um estudo das interações entre as variáveis do processo GMAW-DW (duplo arame) para avaliação da qualidade da solda. Os cordões foram realizados utilizando eletrodos ER70S-6 com 0,8 mm e 1,0 mm de diâmetro em uma chapa de aço ASTM A-36 em posição plana pelo método *tandem*. Foram utilizadas duas fontes independentes de energia e apenas um cilindro de gás de proteção. O número de experimentos realizados foi definido através de um planejamento fatorial completo (2^k). As variáveis de entrada foram: tensão, corrente e velocidade de soldagem. As respostas analisadas foram: altura, largura, penetração e taxa de diluição. Além disso, foram realizadas análises microestruturais e medidas de microdureza nos cordões considerados ótimos. Os resultados encontrados indicaram que as maiores interações entre as variáveis de entrada ocorreram nas combinações dos arames 0,8mm e 1,0mm. No aspecto geométrico, a variação da corrente teve maior influência na profundidade de penetração do cordão, enquanto que a variação da tensão teve maior interferência na largura dos cordões. As maiores taxas de diluição ocorreram com arames de diâmetros iguais. A análise micrográfica indicou uma semelhança quanto aos microconstituintes presentes nas amostras. No entanto, houve um maior refinamento dos grãos em cordões soldados com dois arames com 0,8mm de diâmetro. No caso da microdureza, os maiores valores encontrados foram nos cordões confeccionados com eletrodos de 0,8 mm de diâmetro. De modo geral, os cordões realizados com dois arames com 0,8mm de diâmetro apresentaram geometria mais adequada e maiores taxas de diluição, além de um maior refinamento de grão e maior valor absoluto de microdureza.

Palavras-Chave: GMAW, DW, Planejamento fatorial completo.

Abstract

In this study the interactions among the variables in the GMAN-DW process (double wire) were analyzed to evaluate the quality of the weld. The weld beads were made using ER70S-6 electrodes with diameters of 0,8mm and 1,0 mm in flat ASTM A-36 steel by the tandem method. Two independent sources of solder and only one cylinder of shielding gas were used. The number of experiments performed was defined through a full factorial design (2^k). The input variables were: voltage, current and welding speed. The responses analyzed were: height, width, penetration and dilution rate. In addition, microstructural analysis and microhardness tests were performed on the cords considered to be optimal. The results indicated that the greatest interaction between the input variables occurred in the combinations of 0,8 mm and 1,0 mm wires. In the geometric aspect, the penetration had greater influence of the current while the width had a greater influence of the tension. The highest dilution rates occurred with wires of equal diameters. The micrograph analysis indicated a similarity to the microstructure present in the sampler. However, there was a greater refinement of the grains in welded beads with two 0,8 mm diameter wires. In the case of microhardness, the highest values were generated when the master wire was 0,8 mm in diameter. In general, the weld beads made with two 0,8 mm diameter wires had more adequate geometry and higher dilution rates, besides a greater grain refinement and a higher absolute value of microhardness.

Keywords: GMAW, DW, full factorial design.

Lista de Figuras

FIGURA 1.1	Comparação de macrografias de referentes a juntas de topo soldadas	17
FIGURA 2.1	– Processo básico de soldagem GMAW	21
FIGURA 2.3	– Sistema duplo arame com potencial único	26
FIGURA 2.4	– Sistema duplo arame com potenciais isolados	27
FIGURA 2.5	– Representação do processo <i>Twin</i>	27
FIGURA 2.6	– Representação do processo <i>Tandem</i>	28
FIGURA 2.7	– Comparação das taxas de deposição entre os processos GMAW <i>Tandem</i> e GMAW convencional	29
FIGURA 2.8	– Macrografias soldagens feitas com velocidade de alimentação fixa (17,9m/min) do arame mestre e decaindo em quatro níveis no arame escravo	30
FIGURA 2.9	– Macrografias de soldagens feitas com velocidade de alimentação fixa (17,9m/min) do arame escravo e decaindo em quatro níveis no arame mestre	30
FIGURA 2.10	– Distância bico de contato - peça (DBCP)	32
FIGURA 2.11	– Ângulos de posicionamento da tocha	33
FIGURA 2.12	– Regiões que constituem a junta soldada	35
FIGURA 2.13	– Sub-regiões da ZF	36
FIGURA 2.14	– Diluição medida na seção transversal	37
FIGURA 2.15	– Região da solda de um aço carbono	38
FIGURA 2.16	– Diagrama Fe-C	39
FIGURA 2.17	– Modelo geral de um sistema de transformação	41
FIGURA 2.18	– Planejamento 2 ² com pontos centrais	48
FIGURA 2.19	– Gráfico de Pareto de efeitos	49
FIGURA 2.20	– Exemplo de gráfico de contorno	50
FIGURA 3.1	– Esquema de solda realizada sobre chapa	52
FIGURA 3.2	– Bancada de testes	56
FIGURA 3.3	– Ajuste das tochas para o processo DW	56
FIGURA 3.4	– Análise das propriedades geométricas dos cordões de solda	57
FIGURA 3.5	– Microscópio utilizado para a micrografia dos cordões	58
FIGURA 3.6	– Áreas do cordão de solda	58
FIGURA 4.1	- Influência das variáveis sobre a altura dos cordões	61

FIGURA 4.2 – Influência dos efeitos principais sobre a altura dos cordões	61
FIGURA 4.3 – Influência dos efeitos das interações sobre a altura dos cordões	62
FIGURA 4.4 – Influência das variáveis sobre a largura dos cordões	62
FIGURA 4.5 – Influência dos efeitos principais sobre a largura dos cordões	62
FIGURA 4.6 – Influência dos efeitos das interações sobre a largura dos cordões	63
FIGURA 4.7 – Influência das variáveis sobre a penetração dos cordões	63
FIGURA 4.8 – Influência dos efeitos principais sobre a penetração dos cordões	63
FIGURA 4.9 – Influência dos efeitos das interações sobre a penetração dos cordões	64
FIGURA 4.10 – Influência das variáveis sobre altura dos cordões	65
FIGURA 4.11 – Influência dos efeitos principais sobre a altura dos cordões	65
FIGURA 4.12 – Influência dos efeitos das interações sobre a altura dos cordões	65
FIGURA 4.13 – Influência das variáveis sobre largura dos cordões	66
FIGURA 4.14 – Influência dos efeitos principais sobre a largura dos cordões	66
FIGURA 4.15 – Influência dos efeitos das interações sobre a largura dos cordões	66
FIGURA 4.16 – Influência das variáveis sobre penetração dos cordões	67
FIGURA 4.17 – Influência dos efeitos principais sobre a penetração dos cordões	67
FIGURA 4.18 – Influência dos efeitos das interações sobre a penetração dos cordões	67
FIGURA 4.19 – Influência das variáveis sobre altura dos cordões	68
FIGURA 4.20 – Influência dos efeitos principais sobre a altura dos cordões	68
FIGURA 4.21 – Influência dos efeitos das interações sobre a altura dos cordões	69
FIGURA 4.22 – Influência das variáveis sobre a largura dos cordões	69
FIGURA 4.23 – Influência dos efeitos principais sobre a largura dos cordões	69
FIGURA 4.24 – Influência dos efeitos das interações sobre a largura dos cordões	70
FIGURA 4.25 – Influência das variáveis sobre a penetração dos cordões	70
FIGURA 4.26 – Influência dos efeitos principais sobre a penetração dos cordões	70
FIGURA 4.27 – Influência dos efeitos das interações sobre a penetração dos cordões	71
FIGURA 4.28 – Influência das variáveis sobre a altura dos cordões	72
FIGURA 4.29 – Influência dos efeitos principais sobre a altura dos cordões	72
FIGURA 4.30 – Influência dos efeitos das interações sobre a altura dos cordões	72
FIGURA 4.31 – Influência das variáveis sobre a largura dos cordões	73
FIGURA 4.32 – Influência dos efeitos principais sobre a largura dos cordões	73
FIGURA 4.33 – Influência dos efeitos das interações sobre a largura dos cordões	73
FIGURA 4.34 – Influência das variáveis sobre a penetração dos cordões	74
FIGURA 4.35 – Influência dos efeitos principais sobre a penetração dos cordões	74

FIGURA 4.36 – Influência dos efeitos das interações sobre a penetração dos cordões	75
FIGURA 4.37 – Comparação entre as taxas de diluição nas diferentes combinações entre os arames	76
FIGURA 4.38 – Principais influências das variáveis na taxa de diluição dos cordões	77
FIGURA 4.39 – Principais influências das variáveis na taxa de diluição dos cordões	77
FIGURA 4.40 – Principais influências das variáveis na taxa de diluição dos cordões	78
FIGURA 4.41 – Principais influências das variáveis na taxa de diluição dos cordões	78
FIGURA 4.18 – Análise metalográfica do metal de base	79
FIGURA 4.19 – Metalografia de um corpo de prova soldado	80
FIGURA 4.20 – Metalografia de um corpo de prova soldado	80
FIGURA 4.22 – Metalografia de um corpo de prova soldado	81
FIGURA 4.21 – Metalografia de um corpo de prova soldado	82
FIGURA 4.23 – Perfis de Microdureza Vickers	83

Lista de Tabelas

TABELA 1.1 – Comparação entre os tempos de soldagem entre os processos GMAW Convencional e GMAW – DW	17
TABELA 2.1 – Gases e misturas usadas na soldagem GMAW	34
TABELA 2.2 – Fases presentes no aço carbono	40
TABELA 2.3 – Matriz experimental genérica para o procedimento 2^3	46
TABELA 3.1 – Composição química do arame ER70S-6	52
TABELA 3.2 – Composição química prevista para o aço ASTM A-36	52
TABELA 3.3 – Parâmetros usados para o planejamento fatorial completo para os processos propostos	53
TABELA 3.4 – Resumo dos testes realizados em solda sobre chapa utilizando duplo aramé (DW) com duas fontes: Mestra e Escrava	54
TABELA 3.5 – Parâmetros fixos de soldagem para os processos DW	55
TABELA 4.1 – Corpos de prova com parâmetros ótimos para o processo DW	59

Lista de Abreviaturas e Siglas

ASTM – American Society for Testing and Materials (Sociedade Americana para Testes e Materiais)

AWS – American welding society (Sociedade Americana de Soldagem)

BOP – Bead On Plate (Cordão sobre Chapa)

CC⁺ – Corrente contínua com polaridade inversa

CC⁻ – Corrente contínua com polaridade direta

DBCP – Distância Bico de Contato-Peça

DOE – Design of experiments (Planejamento de Experimentos)

FCAW – Flux core arc welding (Soldagem a arco com eletrodo tubular)

GMAW – Gas Metal Arc Welding (Soldagem a arco sob gás e eletrodo consumível)

GMAW-DW – Gas Metal Arc Welding-Double Wire (Soldagem a arco sob gás e dois eletrodos consumíveis)

HSLA – Aços de alta resistência e baixa liga

LABSIT - Laboratório de Soldagem e Inovação Tecnológica

MB – Metal Base

PSE – Pseudo Erro Padrão

SAW – Submerged arc welding (Soldagem com arco submerso)

SMAW – Shielded Metal Arc Welding (Eletrodo revestido)

ZF – Zona Fundida

ZTA – Zona termicamente afetada

Lista de Símbolos

α - Nível de significância

δ - Coeficiente de diluição

A - Área não fundida do metal de solda

B - Área fundida do metal de solda

Ar - Argônio

C_a - Corrente alta

C_b - Corrente baixa

C_{1a} - Corrente alta do arame 1

C_{1b} - Corrente baixa do arame 1

C_{2a} - Corrente alta do arame 2

C_{2b} - Corrente baixa do arame 2

CO_2 - Dióxido de Carbono

He - Helio

N - Nitrogênio

O_2 - Oxigênio

T_a - Tensão alta

T_b - Tensão baixa

T_{1a} - Tensão alta do arame 1

T_{1b} - Tensão baixa do arame 1

T_{2a} - Tensão alta do arame 2

T_{2b} - Tensão baixa do arame 2

V_a - Velocidade de soldagem alta

V_b - Velocidade de soldagem baixa

V_{1a} - Velocidade de soldagem alta do arame 1

V_{1b} - Velocidade de soldagem baixa do arame 1

V_{2a} - Velocidade de soldagem alta do arame 2

V_{2b} - Velocidade de soldagem baixa do arame 2

SUMÁRIO

1.	INTRODUÇÃO	16
1.1.	Considerações iniciais	16
1.2.	Objetivos	18
1.2.1.	Objetivos Principais	18
1.2.2.	Objetivos Específicos	18
1.3.	Justificativa	18
2.	FUNDAMETAÇÃO TEÓRICA	20
2.1.	Considerações iniciais	20
2.2.	Processo GMAW Convencional	20
2.2.1.	Principais vantagens	22
2.2.2.	Principais limitações	22
2.3.	Processo GMAW Duplo Arame	23
2.3.1.	GMAW Duplo Arame Com Potencial Único	26
2.3.2.	GMAW Duplo Arame Com Potenciais Isolados	26
2.4.	Alinhamento dos Eletrodos	27
2.4.1.	<i>Twin</i>	27
2.4.2.	<i>Tandem</i>	28
2.5.	Parâmetros de Soldagem	30
2.5.1.	Corrente	30
2.5.2.	Tensão	31
2.5.3.	Velocidade de Soldagem	31
2.5.4.	Velocidade de Alimentação	31
2.5.5.	Extensão Livre do Eletrodo (<i>Stick Out</i>)	32
2.5.6.	Ângulo de Ataque	33
2.5.7.	Gases de Proteção	33
2.5.7.1.	Proteção gasosa na soldagem duplo arame	34
2.6.	Metalurgia da Soldagem	35
2.6.1.	Considerações Iniciais	35
2.6.2.	Geometria da Junta Soldada	35
2.6.3.	Diluição	37
2.6.4.	Características da Zona Termicamente Afetada	37
2.6.5.	Microestrutura do Aço Baixo Carbono	39

2.7.	Planejamento Experimental	41
2.7.1.	Planejamento Fatorial	43
2.7.1.1.	Conceitos básicos	43
2.7.1.2.	Planejamento fatorial completo 2^k	45
2.7.1.3.	Representação Gráfica	49
2.7.1.4.	Planejamento fatorial em soldagem	50
3.	PROCEDIMENTO EXPERIMENTAL	52
3.1.	Materiais utilizados	52
3.2.	Preparação das amostras	52
3.3.	Planejamento fatorial	53
3.4.	Parâmetros de soldagem	55
3.5.	Processos de soldagem	55
3.6.	Análise da geometria dos cordões	57
3.6.1.	Influência das variáveis na geometria dos cordões	57
3.7.	Análise metalográfica	57
4.	RESULTADOS E DISCUSSÕES	59
4.1.	Análise da geometria dos cordões	59
4.1.1.	Influência das variáveis na geometria dos cordões	60
4.1.2.	Comparação entre as taxas de diluição	75
4.2.	Análise Metalográfica	79
4.3.	Ensaio de Microdureza	83
5.	CONCLUSÕES	84
6.	SUGESTÃO PARA TRABALHOS FUTUROS	85
	REFERÊNCIAS	86
	APÊNDICE A	92
	APÊNDICE B	97
	APÊNDICE C	114
	APÊNDICE D	164

1. INTRODUÇÃO

1.1. Considerações iniciais

Atualmente, as indústrias têm como um dos principais objetivos a busca da maior produtividade com o menor custo de fabricação. Neste âmbito, na área de soldagem têm sido utilizados vários processos dentre os quais, tem-se destacado o processo GMAW (*Gás Metal Arc Welding*). Isto vem ocorrendo porque os processos de soldagem a arco elétrico com atmosfera protetora (GMAW) têm apresentado um contínuo desenvolvimento devido às suas boas flexibilidades e custos, sendo esses processos os mais adequados à mecanização (MOREIRA, *et. al.*, 2007).

A soldagem por arco é um importante processo de junção em indústrias de manufatura modernas, como indústria de mineração para transporte a granel, transporte rodoviário e ferroviário, geração de energia, petroquímica, indústrias de celulose e papel e indústrias de construção, além da indústria automobilística e principalmente a naval envolvendo a parte de navios e plataformas.

A indústria naval brasileira apresentou nos últimos anos uma retomada de suas atividades. Este movimento está relacionado principalmente ao programa da Petrobrás em aumentar a produção de petróleo em alto mar. Exigências para que parte da construção das plataformas, embarcações e seus equipamentos sejam realizados por construtores locais vêm promovendo a reativação dos estaleiros e atraindo investidores estrangeiros que arrendaram estaleiros no Brasil, (FERRAZ *et al.*, 2002). A demanda expandiu ainda mais quando a Petrobrás lançou o programa de substituição da frota de navios de apoio “*offshore*” definindo, no edital de concorrência internacional, preferência por navios de bandeira brasileira, induzindo as empresas operadoras, nacionais e estrangeiras, a contratar a construção local dessas embarcações, (VIEIRA, 2006).

Segundo Garcia (2014), a exploração e a produção do Pré-Sal no Brasil tem aumentado a necessidade do desenvolvimento de soluções que reduzam os custos e os prazos dos projetos na área de soldagem.¹

Devido à necessidade da indústria em aumentar a produtividade com menor tempo de produção, o processo GMAW com duplo arame (GMAW – DW) foi desenvolvido. Esse processo tem se mostrado uma técnica promissora, com alta empregabilidade na indústria naval e petrolífera. Essa técnica é especialmente utilizada para enchimento de chanfros e

¹ Notícia fornecida por < <http://www.abemi.org.br/cenpespetrobras-fala-sobre-avancos-da-soldagem-pre-sal/> >, em 2014.

soldagem de revestimento. O processo GMAW – DW consiste na formação de dois arcos elétricos entre a peça e dois eletrodos alimentados continuamente e protegidos por um fluxo de gás inerte, ativo ou ambos (SANCHES, 2007).

O desenvolvimento da soldagem com duplo arame apresenta como meta principal o aumento da produtividade pela redução no tempo de operação. Esta técnica é especialmente utilizada utilizando o processo conhecido como *Tandem*, ou seja, eletrodos em posição longitudinal. Nessa configuração é utilizado, simultaneamente, dois ou três eletrodos. É muito comum que o eletrodo guia seja CC^+ para garantir melhor penetração.

Mulligan e Melton (2002) mostram como a redução no número de passes no processo duplo arame em relação ao convencional, garante a redução no tempo de soldagem, como pode ser observado na Figura 1 e na Tabela 1.

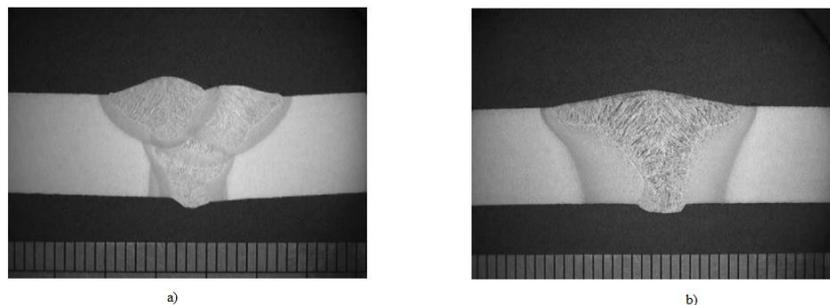


Figura 1.1 – Comparação de macrografias de referentes a juntas de topo soldadas: a) GMAW convencional (5 passes); b) GMAW - DW (2 passes) (Fonte: Mulligan & Melton, 2002).

Tabela 1.1 – Comparação entre os tempos de soldagem entre os processos GMAW Convencional e DW (Fonte: Mulligan & Melton, 2002).

Tempo (min/s) Processo	GMAW Convencional (5 passes)	GMAW Duplo Arame (2 passes)
Arco Aberto	9/33	3/26
Outros	6/23	2/16
Total	15/56	5/42

Para aperfeiçoar os processos de soldagem, as ferramentas estatísticas têm sido uma grande aliada, pois permitem a melhoria na qualidade e na produtividade, reduzindo o tempo de análise e os custos do processo. Entre essas ferramentas, o delineamento de experimentos, ou DOE (*Design Of Experiments*) se destaca por definir quais são as melhores condições de ajuste para a se alcançar o resultado desejado.

De acordo com Montgomery (2012), o planejamento experimental é extremamente importante para engenheiros e cientistas melhorarem o desempenho de um processo de

fabricação. Essa ferramenta representa um conjunto de critérios estabelecidos com fundamentos científicos e estatísticos, objetivando determinar a influência de diversas variáveis nos resultados de um processo.

O delineamento de experimentos ajuda a definir o menor número de experimentos necessários para a obtenção de um determinado resultado com a confiabilidade requerida. No caso dos processos de soldagem GMAW, o DOE define o número de cordões a serem realizados utilizando os valores máximos e mínimos das principais variáveis do processo. Essa ferramenta também aponta quais dessas variáveis influenciam significativamente as variáveis de resposta dos cordões realizados.

Deste modo, este trabalho foi motivado pelos seguintes questionamentos:

- É vantajoso utilizar duplo arame?
- A utilização de eletrodos com diferentes diâmetros afeta a qualidade da solda?

1.2. Objetivos

1.2.1. Objetivos Principais

- Verificar a qualidade dos cordões utilizando o processo de soldagem GMAW Duplo arame (DW) em aço A-36. As soldas foram feitas sobre chapas, utilizando o método *Tandem*.

1.2.2. Objetivos específicos

- Verificar a influência das variáveis (tensão, corrente e velocidade de soldagem) sobre as propriedades metalúrgicas no cordão de solda.
- Investigar a diluição do metal de solda no processo de soldagem GMAW-DW.
- Analisar o perfil de microdureza entre as zonas termicamente afetadas (ZTA), metal de base e zona fundida.
- Verificar a interação da tensão, corrente e velocidade de soldagem nas características geométricas do cordão, ou seja, penetração, largura e altura.

1.3. Justificativa

O desenvolvimento da soldagem com duplo arame apresenta como meta principal o aumento da produtividade pela redução no tempo de operação. Esta técnica é especialmente

utilizada com vantagens na soldagem de revestimento e no enchimento de chanfros, utilizando o processo conhecido como *Tandem*, ou seja, eletrodos alinhados em posição longitudinal.

Além disso, o conhecimento da influência das variáveis do processo de soldagem no cordão gerado é essencial para a compreensão do mecanismo do processo GMAW-DW, da formação do cordão e da microestrutura dos grãos, já que a relação entre eles é bastante complexa.

Este trabalho tem como intuito utilizar metodologias comparativas, bem como avaliar as variáveis pertinentes, buscando um melhor entendimento tecnológico e produtivo do processo de soldagem.

2. FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA

Este capítulo tem como finalidade apresentar informações teóricas necessárias para a compreensão e desenvolvimento da pesquisa sobre o processo de soldagem GMAW duplo arame (DW) bem como o planejamento experimental (DOE) e suas aplicações neste processo.

A revisão da literatura é uma parte essencial no processo de investigação, pois além de definir bem o problema, consegue oferecer uma ideia precisa a respeito do estado atual dos conhecimentos sobre o tema, suas lacunas e contribuições para o desenvolvimento da pesquisa (BENTO, 2012).

2.1. Considerações iniciais

Os processos de soldagem com proteção gasosa tiveram início na década de 20. Foi nesta época a concepção básica do GMAW (*Gas Metal Arc Welding*), entretanto, este processo somente se tornou comercial após 1948. Inicialmente, foi considerado um processo de alta densidade de corrente, pequenos diâmetros de eletrodos de metal nu onde se utiliza um gás inerte para proteção. Sua primeira aplicação foi na soldagem de alumínio. Por causa dessa característica, o processo era conhecido como *Metal Inert Gas* - MIG, denominação ainda utilizada para o processo. O processo foi aperfeiçoado, passando a utilizar baixas intensidades de corrente contínua e corrente alternada, aplicação em uma vasta faixa de materiais e emprego de gás ativo, inerte ou uma mistura deles. Este último desenvolvimento levou à aceitação formal do termo GMAW (*Gas Metal Arc Welding*) para denominação do processo, devido aos gases inertes e ativos utilizados.

2.2. Processo GMAW convencional

O processo GMAW destaca-se como um dos principais processos de soldagem a arco empregado para a recuperação de áreas erodidas devido a ação da cavitação. Além disso, o processo tende, cada vez mais, a aplicar suas variantes em condições automatizadas. Isso faz com que seja necessária uma abordagem mais detalhada sobre o processo.

Em 2008, o Brasil ocupava a décima colocação no *ranking* de produção de aço, aumentando a importância da pesquisa sobre soldagem no país, principalmente o processo GMAW (SCOTTI, 2008).

No setor industrial, 80% das aplicações robotizadas são empregadas para soldagem de união, sendo que 70% desta porcentagem são utilizadas em processos de soldagem GMAW.

Tal fato aumenta o interesse das empresas em pesquisa sobre tal processo (MOGROVEJO, 2011).

A técnica GMAW utiliza um arco entre uma alimentação contínua de metal e a poça de fusão, empregando como proteção para a poça de soldagem contra contaminação do ar externo, uma fonte de gás de proteção. Além disso, pode ser utilizado em materiais de diferentes espessuras.

Esta metodologia apresenta boa flexibilidade, fácil mecanização e alta produtividade fazendo com que se reduza o tempo e os custos da produção. (WAINER *et. al*, 2004).

O processo GMAW pode ser utilizado nos modos automático, semiautomático e mecanizado. Todos os metais comercialmente importantes, tais como aços carbono, aços de alta resistência e baixa liga (HSLA), aço inoxidável, alumínio, cobre, titânio e ligas de níquel podem ser soldados em todas as posições através da escolha apropriada do gás de proteção, dos eletrodos e das variáveis de soldagem (MARQUES *et. al*, 2009).

Para esse processo utiliza-se a forma mais simples de equipamento. A fonte de energia é do tipo tensão constante e a corrente é uma variável dependente da velocidade de alimentação.

A Figura 2.1 ilustra esquematicamente o processo.

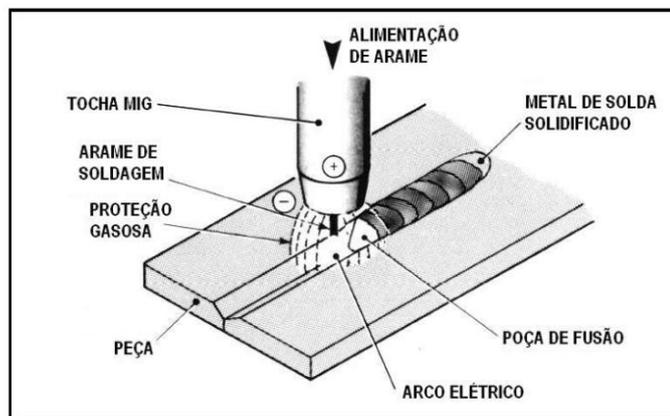


Figura 2.1 – Processo básico de soldagem GMAW.
Fonte: (Fortes, 2005)

A soldagem GMAW convencional normalmente é realizada usando a polaridade CC^+ (com o eletrodo ligado no polo positivo e a peça ao polo negativo). Isso faz com que a solda tenha grande profundidade de penetração, estabilidade do arco, transferência satisfatórios e pouca quantidade de respingos. A soldagem com o eletrodo ligado no polo negativo CC^- , apresenta baixa penetração, alta taxa de fusão, gerando uma alta quantidade de respingos. (SOUZA *et. al*, 2009).

Os principais componentes do processo são:

- **Arco elétrico:** baseia-se em uma descarga de corrente elétrica, relativamente alta, sustentada por um gás ionizado (AWS, 1987).
- **Tocha:** abastece a região da solda com gás protetor, guia o arame e conduz a corrente de soldagem através do tubo de contato.
- **Bico de contato:** energiza o eletrodo e mantém o tubo de contato deslizante para que a passagem do arame ocorra sem restrições.

2.2.1. Principais vantagens

- É o único processo de eletrodo consumível que pode ser utilizado com todos os metais comerciais e ligas;
- Não existe a restrição de tamanhos limitados de eletrodos encontrados no SMAW (soldagem a arco com eletrodo revestido);
- A soldagem pode ser feita em todas as posições, fator não encontrado em SAW (soldagem com arco submerso);
- As taxas de deposição são significativamente maiores que aquelas obtidas com SMAW;
- As velocidades de soldagem são maiores que aquelas alcançadas com eletrodos revestidos devido à alimentação contínua de eletrodo e às altas taxas de deposição;
- Longos cordões podem ser feitos sem paradas devido à alimentação contínua;
- Com transferência spray é possível se conseguir maior penetração que no eletrodo revestido, o que pode permitir a utilização de filetes menores de solda com a resistência equivalente;
- Limpeza mínima após solda é necessária devido à ausência de escória pesada;

Estas vantagens fazem do processo particularmente bem adequado para alta produção e soldagem automatizada. Isto se tornou evidente com o início da utilização de robôs na produção, onde GMAW tem sido o processo mais utilizado.

2.2.2. Principais Limitações

- O equipamento de soldagem é mais complexo, mais caro e menos portátil em relação ao SMAW;

- O processo GMAW apresenta maior dificuldade de utilização em locais de difíceis acessos porque a tocha de soldagem é maior que a pinça utilizada no SMAW, além da tocha ter de estar perto da junta a ser soldada para assegurar proteção suficiente;
- O arco deve estar protegido de correntes de ar que possam dispersar o gás de proteção. Isto limita a soldagem em campo;
- O processo resulta em altos níveis de radiação e calor que pode prejudicar a saúde do operador.

2.3. Processo GMAW duplo arame

Visando maior produção, foi criado o processo GMAW-DW (duplo arame). Ele se destaca na soldagem de revestimento e no enchimento de chanfros, pois realiza alta taxa de deposição.

Esta técnica vem sendo investigada desde a década de 1950, mas somente com a implantação de equipamentos eletrônicos para soldagem, o processo se tornou disponível no mercado (MICHIE *et. al*, 1999).

O processo GMAW-DW tem como característica básica a abertura de dois arcos elétricos entre uma única poça de fusão e os dois eletrodos consumíveis. Os arcos e a poça de fusão são protegidos por um gás inerte ou oxidante (ativo) ou pela mistura deles. (MOTTA, 2002).

A aplicação de dois eletrodos para uma determinada corrente aumenta a área da poça de fusão onde atua a força do arco podendo utilizar maiores valores de corrente de soldagem, possibilitando maiores taxas de deposição e de fusão (GROETELAARS, 2005).

O espaçamento e o ângulo entre os eletrodos, além da orientação da solda são parâmetros que devem ser levados em consideração no processo duplo arame. O espaçamento entre os eletrodos e o ângulo dos mesmos são geralmente fixados quando uma tocha duplo arame adequada for utilizada (MICHIE *et. al*, 1999). Estudos realizados por Akulov *et. al* (1966) mostram que o espaçamento entre os eletrodos e a orientação dos mesmos tem efeitos visíveis na largura e na penetração da poça de fusão. Os autores ainda destacam que a orientação do eletrodo pode ser ajustada girando a tocha para criar cordões maiores e preencher a abertura da junta.

De acordo com Mulligan & Melton (2002), o processo GMAW-DW gera cordões com maiores penetrações quando comparados ao processo convencional usando uma mesma

velocidade de soldagem. Segundo os autores, a soldagem duplo arame possibilita o uso de maiores correntes devido à formação de uma poça de fusão de maiores dimensões.

Michie *et. al* (1999) afirma que o processo GMAW-DW é mais adequado para materiais susceptíveis a defeitos de porosidade devido ao alongamento da poça de fusão e um maior tempo para os gases dissolvidos se afastarem dela. No entanto, Akulov *et. al* (1966) considera que o aumento da movimentação da poça de fusão é que realmente contribui para a maior difusão dos gases diluídos na poça, o que, segundo Grotelaars (2005), é questionável a depender do sentido desta movimentação, podendo tanto contribuir para a difusão dos gases quanto para o aumento da absorção dos mesmos.

De acordo com Wu *et. al* (2012), para se obter um cordão de solda com dimensões adequadas, a energia do calor deve ser adequadamente repartida entre o arame adicional e o metal base, isto é, a corrente que flui no fio deve ser suficiente para garantir uma maior taxa de fusão do arame, enquanto a corrente inferior relativa deve fluir através da poça de trabalho para a produção de uma poça da fusão.

Wu *et. al* (2012) concluíram que o sistema GMAW-DW é capaz de diminuir tanto a concentração de força do arco e o impacto da gota de modo que a dinâmica do fluxo no sentido contrário do metal fundido na poça de fusão é enfraquecida, acumulando metal fundido na cauda da poça durante o processo e, desse modo, impedindo a formação do cordão côncavo.

Segundo os autores Groetelaars (2005, 2007) e Scotti & Ponomarev (2008), uma das vantagens do processo duplo arame é a possibilidade de se trabalhar com arames com diferentes diâmetros e composições químicas. Além disso, a utilização de duas fontes independentes comandando os dois alimentadores possibilita trabalhar com diferentes parâmetros elétricos sobre cada arame. Deste modo, pode-se também alterar a DPCP (distância bico de contato-peça) e a disposição dos arames (série ou paralelo), alternando as características geométricas do cordão gerado.

As principais vantagens do processo GMAW-DW são:

- Maior produtividade;
- Menor aporte térmico à peça, causando menos distorções;
- Soldagem com altas velocidades;
- Controle da geometria do cordão de solda através do posicionamento da tocha, do comprimento do arco e da corrente de cada arame;
- Menor deposição de hidrogênio no cordão de solda;

- Menor quantidade de salpicos;
- Soldagem em várias posições. Pode ser usado na soldagem automática e semiautomática;
- Baixo investimento em acessórios adicionais;
- Facilidade de combinação de diferentes diâmetros e composição de arames
- Utiliza a mesma alimentação de energia e o gás de proteção do processo GMAW/FCAW (*Flux Core Arc Welding*);
- Maior taxa de deposição e rendimento equivalente à soldagem GMAW/FCAW;
- Maior área revestida na unidade de tempo;
- Excelente qualidade superficial e desempenho do depósito de solda;
- Ausência do sopro magnético;
- Pode ser utilizado em trabalhos de pequeno e médio porte, além de produção e manutenção;
- Alimentação dos arames com diferentes velocidades e diferentes intensidades de corrente;
- Economia no consumo de gás, uma vez que se pode usar apenas o gás de uma das máquinas.

As principais desvantagens são:

- Grande complexidade operacional;
- Maior número de parâmetros a serem ajustados;
- Excessiva geração de fumos e radiação luminosa;
- Instabilidade devido à deflexão magnética (proximidade dos arcos);
- As taxas de fusão são ainda limitadas (devido principalmente às condições físicas do arco e capacidade mecânica da tocha em correntes elevadas);
- Dificuldade na montagem e preparação na área de trabalho (aumento da complexidade do sistema);

O processo pode ser classificado de uma forma geral, segundo a conexão elétrica dos eletrodos, em sistemas de duplo arame com potencial único e sistemas com potencial isolado.

2.3.1. GMAW Duplo Arame Com Potencial Único

Nesse processo, os eletrodos são fornecidos por alimentadores de arames independentes. A energização ocorre no bico de contato, submetendo-os ao mesmo potencial elétrico. Esse sistema permite a utilização de uma ou duas fontes de potência. Para sistemas que utilizam uma única fonte de potência, esta deverá fornecer correntes com magnitudes suficientes para que ocorra a fusão dos dois arames simultaneamente (MOTTA, 2002).

O processo GMAW-DW com potencial único apresenta um menor custo operacional, comparado ao sistema com potenciais isolados, devido ao menor número de equipamentos e acessórios utilizados em sistemas (BARROZO, 2006).

A Figura 2.3 ilustra o esquema do processo duplo arame com potencial único.

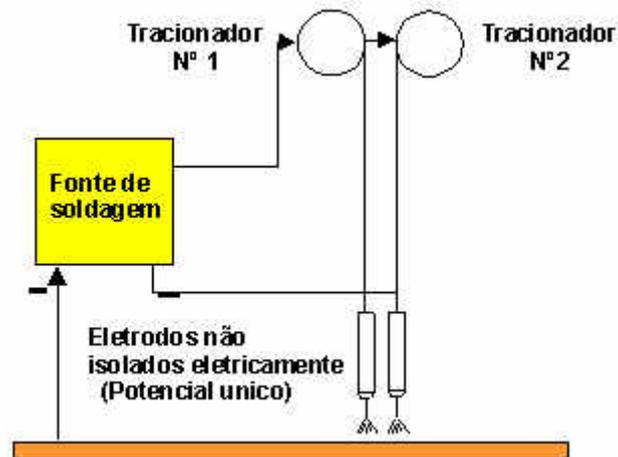


Figura 2.3 – Sistema duplo arame com potencial único
Fonte:Gonzáles & Dutra (1999)

2.3.2. GMAW duplo arame com potenciais isolados

Neste processo há um isolamento elétrico entre os eletrodos e a manutenção dos arcos é realizada através de fontes de soldagem isoladas. Os arames são fornecidos por dois alimentadores de arames independentes (MOTTA, 2002). A Figura 2.4 ilustra o esquema do processo duplo arame com potencial único.

Nesta configuração os dois arcos podem ser controlados separadamente, sendo possível conferir suas funções e selecionar os parâmetros para cada um deles, permitindo maior controle da geometria do cordão (BARROZO, 2006).

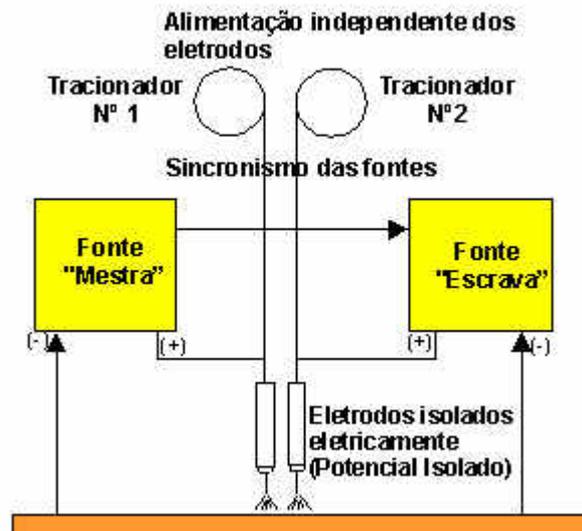


Figura 2.4 – Sistema duplo arame com potenciais isolados.
Fonte: González & Dutra (1999)

2.4. Alinhamento dos Eletrodos

Existem duas maneiras de arranjo de alinhamento entre os eletrodos na tocha de soldagem: *Twin* (posição transversal) e *Tandem* (posição longitudinal). Esses arranjos permitem alterar a disposição geométrica dos arames em relação à peça.

2.4.1. *Twin*

Os dois arames se encontram lado a lado em uma posição transversal no sentido do deslocamento da tocha (GONZÁLES, 1999). A utilização do método *twin* é mais utilizada em juntas de topo e revestimentos soldados (BACELAR E FERRAZ, 2005).

Para soldas de revestimento, o método *Twin* produz cordões com pequenas penetrações e baixas diluições, que são desejáveis nesta aplicação (GONZÁLES, 1999).

Neste processo é possível controlar a geometria da solda atuando diretamente no ângulo entre os eletrodos e no afastamento dos mesmos (MOTTA & DUTRA, 2000).

A Figura 2.5 ilustra o método *Twin*.

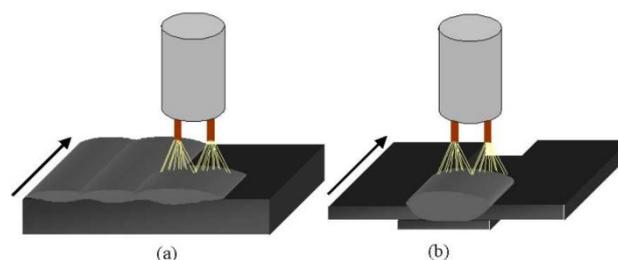


Figura 2.5 – Representação do método *Twin*: (a) revestimentos soldados; (b) junta de topo.
Fonte: Scotti e Ponomarev (2008).

2.4.2. Tandem

Por definição da norma AWS D1.1/D1.1M: 2004 – *Structural Welding Code – Steel* – o termo *Tandem* refere-se ao arranjo geométrico de eletrodos, em que a linha entre os arcos é paralela à direção de soldagem. Esse arranjo é comum em processos de soldagem que requerem alta produtividade e velocidade de soldagem, exigindo um alto grau de mecanização ou até mesmo automatização (AWS, 2004).

O alinhamento das tochas deve ser correto. O eixo central entre as tochas deve ser normal à peça a ser soldada. Além disso, a distância entre os eletrodos deve ser calculada, pois quanto menor a distância entre as tochas, maior será a velocidade de soldagem (TEIXEIRA, 2011).

A Figura 2.6 ilustra o método *Tandem*.

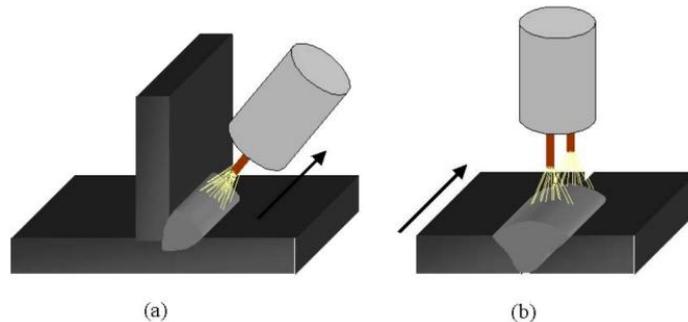


Figura 2.6 – Representação do método *Tandem*: (a) soldas de filete; (b) soldas de topo.
Fonte: Groetelaars (2005).

Ueyama *et. al.* (2005 f) verificaram o efeito da configuração da angulação dos eletrodos e da distância entre eles na formação do cordão de solda com os eletrodos posicionados em *Tandem*. Os autores obtiveram melhor aspecto superficial quando a distância entre os eletrodos ficava dentro da faixa de 9 a 12 mm. Ainda segundo os autores, a inclinação do eletrodo de trás em 9° no sentido “empurrando” promove melhor aspecto superficial dos cordões de solda, (PESSOA, 2007).

Na soldagem em tandem, há usualmente um ajuste de uma maior potência no arco da frente, responsável pela formação de uma cratera no metal de base para aumentar a penetração. O segundo arco, com um nível de energia mais baixo, é responsável pelo preenchimento total da cratera com metal fundido, formando cordões de solda com geometria mais favorável (MOTTA & DUTRA 2000).

Segundo Morehead (2003) o sistema tandem apresenta maiores taxas de deposição e produtividade quando comparado ao sistema GMAW convencional. Na fabricação de chapas pesadas, o processo GMAW no modo *tandem* pode representar de 30 a 80% no aumento do

potencial de deposição comparado ao processo convencional. Esta comparação pode ser observada na Figura 2.7.

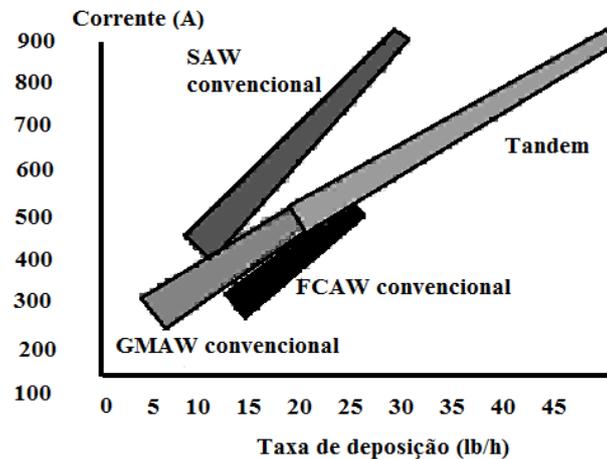


Figura 2.7 – Comparação das taxas de deposição entre os processos GMAW *Tandem* e GMAW convencional (MOREHEAD, 2003).

Wei *et. al* (2013) concluíram que a distância entre os bicos de contato dos arames mestre e escravo determina, principalmente, se o processo de soldagem pode ser realizado com sucesso ou não. O espaço entre os dois arames deve ser próximo o suficiente para que ambos "entreguem" o metal a uma única poça de fusão, já que nesse processo, o arame mestre é responsável pela maioria da penetração das raízes do metal base, enquanto o arame escravo controla a poça de fusão para o contorno do cordão ao mesmo tempo em que aumenta a taxa global de deposição (MOREHEAD 2003).

Schnick *et. al* (2011) relatam que grandes espaçamentos entre os arames geram uma larga poça de fusão e um processo estável. Um espaço mais curto é usado quando se precisam obter pequenas poças de soldagem.

O método *Tandem* pode aumentar drasticamente a velocidade de soldagem e as taxas de deposição em chapas grossas. O aumento da produtividade usando esta técnica pode melhorar a rentabilidade do processo. Além disso, o custo do equipamento pode ser justificado pelo menor número de passes realizados, diminuindo o tempo de retorno do investimento.

2.5. Parâmetros de Soldagem

Os parâmetros de soldagem exercem grande influência sobre a geometria do cordão em suas propriedades mecânicas, nos defeitos operacionais, na estabilidade do arco, na qualidade, na produtividade e nos custos da junta soldada (KARADENIZ *et. al* , 2012). Definem também a maior ou menor probabilidade de ocorrência de alguns tipos de defeitos, como trincas, poros, mordeduras e outros. Dimensões inadequadas do cordão de solda podem contribuir para falha de uma estrutura soldada, pois a penetração determina a capacidade de carga de tensão de uma junta soldada (SMATI, 1985). Por essa razão, os parâmetros devem ser mantidos dentro dos limites de tolerância exigidos pelo fabricante dos eletrodos durante todo o processo (SCOTTI & PONOMAREV, 2008). Cada uma dessas variáveis pode ser controlada separadamente, apesar de que o efeito de uma está diretamente relacionado com a atuação da outra. Por essa razão, é necessário selecionar adequadamente os parâmetros que serão utilizados em cada tarefa.

No processo de soldagem com duplo arame, os parâmetros devem ser escolhidos cuidadosamente. A velocidade de alimentação deve ser mantida constante e estável, caso contrário, poderão ocorrer irregularidades no cordão (TUŠEK, 2012).

Diversas variáveis influenciam nas características do cordão de solda, dentre elas destacam-se corrente, tensão e velocidade de soldagem, comprimento e diâmetro do eletrodo, inclinação da tocha de soldagem, proteção gasosa e velocidade de alimentação do arame.

2.5.1. Corrente

Controla a taxa de fusão do eletrodo, a profundidade de fusão e a geometria da peça soldada. Trabalhos realizados por Sen *et. al* (2015) mostram que a um nível de corrente média mais elevado, o aumento da tensão do arco aumenta a largura do cordão de solda.

Segundo KARADENIZ *et. al* (2007), o efeito da corrente de soldagem é cerca de 2,5 vezes maior do que a tensão do arco e velocidade de soldagem na penetração.

O intervalo de corrente utilizada no processo deve ser previamente conhecido. Arames com diâmetros maiores suportam altos valores de correntes, gerando maiores valores de penetração e taxa de fusão (TEIXEIRA, 2011).

Nos processos GMAW a corrente de soldagem está diretamente relacionada à velocidade de alimentação do arame.

A utilização de dois arames para uma determinada corrente aumenta a área da poça de fusão onde a força do arco atua, possibilitando a utilização de altos valores de corrente, resultando em maiores taxas de deposição e de fusão (GROETELAARS 2005).

2.5.2. Tensão

Determina o formato da zona fundida e o reforço da solda. A tensão influencia diretamente o comprimento do arco que controla o perfil do cordão, a profundidade da penetração e a quantidade de respingos.

Altas tensões produzem soldas mais largas, lisas e menos profundas que as soldas realizadas com baixos valores de tensão. Além disso, causa um aumento desproporcional do arco elétrico, resultando em soldas com porosidades, salpicos e mordeduras (TEIXEIRA, 2011).

2.5.3. Velocidade de Soldagem

A velocidade de soldagem representa a taxa linear em que o arco se move ao longo da junta de solda. Exerce influência na taxa de deposição e a geometria do cordão (TEIXEIRA, 2011). Diminuindo a velocidade de soldagem até certo valor, haverá também diminuição da penetração. Isto ocorre devido à pressão da grande quantidade de banho de fusão sobre o eletrodo, amortecendo a força do arco penetrante (TEWARI *et. al*, 2010). Velocidades utilizadas acima do limite estabelecido produzem trincas por solidificação (TEIXEIRA, 2011).

2.5.4. Velocidade de alimentação

É a velocidade com que o arame chega à poça de fusão. Para o processo duplo arame, a velocidade deve variar entre 7 m/min e 20 m/min, gerando assim, o aumento de produção. Além disso, a regulagem da velocidade de alimentação deve privilegiar a corrente do arame mestre de 40 a 60% acima da corrente do arame escravo (SCOTTI & PONOMAREV, 2008).

No processo duplo arame com potenciais isolados existe a possibilidade de variar as velocidades de alimentação de cada arame separadamente.

Mulligan & Melton (2002) estudaram a influência da variação das velocidades de alimentação no processo duplo arame sob a mudança no perfil soldado numa velocidade constante de 600 mm/min. Os autores concluíram que ambas as velocidades quando aumentadas proporcionam um aumento da penetração e da largura dos cordões. O arame mestre exerce maior influência na penetração, enquanto o arame escravo tem influência direta

na largura do cordão. As Figuras 2.8 e 2.9 ilustram a influência das variações das velocidades de alimentação na geometria dos cordões de solda.

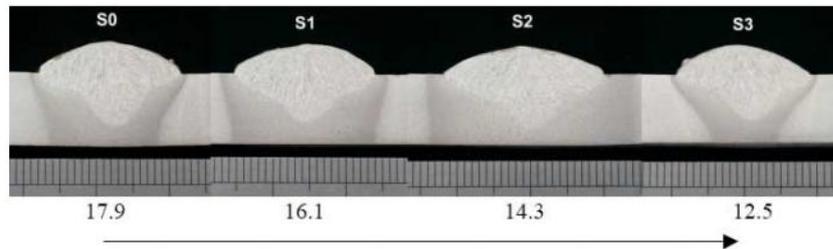


Figura 2.8 – Macrografias de soldagens feitas com velocidade de alimentação fixa (17,9m/min) do arame mestre e decaindo em quatro níveis no arame escravo (Fonte: Mulligan & Melton, 2002).

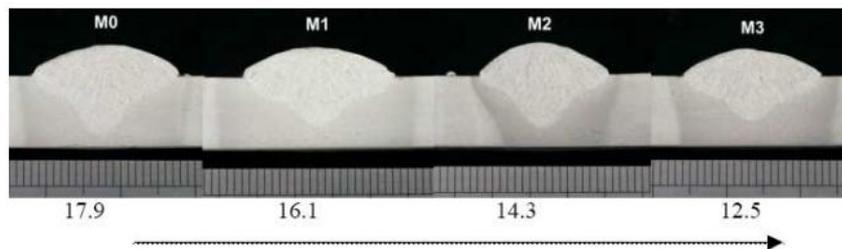


Figura 2.9 – Macrografias de soldagens feitas com velocidade de alimentação fixa (17,9m/min) do arame escravo e decaindo em quatro níveis no arame mestre (Fonte: Mulligan & Melton, 2002)

2.5.5. Extensão livre do eletrodo (*stick out*)

A Distância Bico de Contato e Peça é a distância entre o último ponto de contato elétrico e a peça de trabalho (FORTES, 2005).

Baixos valores da Distância Bico de Contato e Peça podem ocasionar penetração profunda, reforços altos e cordões estreitos e aderência de salpico no bocal. Altos valores de DBCP podem prejudicar a proteção gasosa do local de soldagem, facilitar a oscilação do arame projetado, aumentar a incidência de respingos e porosidade e tornar o cordão irregular (BARRA, 2003). A Figura 2.10 ilustra a distância entre o bico de contato e a peça.

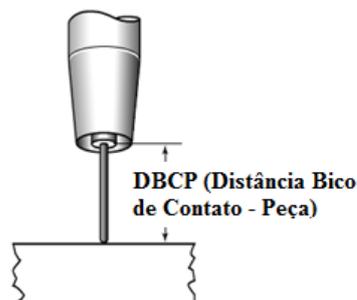


Figura 2.10 – Distância bico de contato-peça (DBCP).
Fonte: Lincoln Eletric (2010)

2.5.6. Ângulo de ataque

A tocha pode ser posicionada de três maneiras em relação ao ângulo de deslocamento.

- **Positivo (puxando a tocha):** O arame é alimentado no sentido oposto ao deslocamento do arco, causando aumento na penetração e reforço convexo (BARRA, 2003).
- **Negativo (empurrando a tocha):** O arame é depositado no mesmo sentido do deslocamento do arco, reduzindo a penetração e tornando o cordão mais largo e plano (TEIXEIRA, 2011).
- **Perpendicular:** Tem influência na simetria do cordão.

A Figura 2.11 mostra os ângulos de posicionamento da tocha.

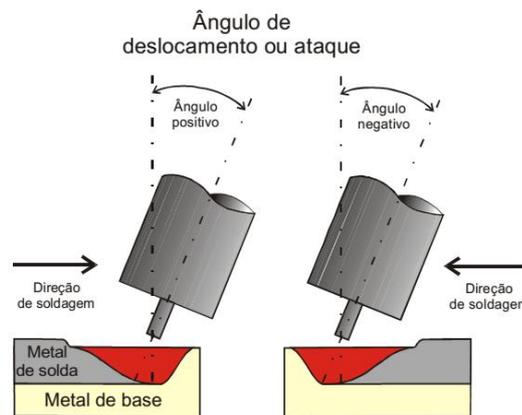


Figura 2.11 – Ângulos de posicionamento da tocha.
Fonte: Barra (2003).

2.5.7. Gases de proteção

O processo GMAW exige um fluxo de gás para proteger a poça de fusão e as gotas em transferência, estabilizar o arco, controlar a operacionalidade e a transferência metálica, influir sobre a geometria, propriedades mecânicas e características metalúrgicas da solda (SCOTTI & PONOMAREV, 2008).

O gás de proteção representa 3% do custo da soldagem de um aço carbono, sendo 18% de arame, 2% de energia e 77% de mão de obra, (IRVIN, 1999).

Os gases mais utilizados na soldagem GMAW são: argônio (Ar), hélio (He) e dióxido de carbono (CO₂). Esses gases podem ser empregados puros, combinados ou misturados com outros gases, produzindo soldas com qualidade (FORTES, 2005). A Tabela 2.1 mostra as aplicações desses gases na soldagem GMAW.

Tabela 2.1 – Gases e misturas usadas na soldagem GMAW.

Gases ou Mistura	Comportamento Químico	Aplicações
Argônio	Inerte	Quase todos os metais, exceto aço
Hélio	Inerte	Al, Mg, Cu e suas ligas. Alta penetração
Ar + He (20 – 50%)	Inerte	Idem He, mas melhor que 100% He
Nitrogênio	-----	Cobre, maior energia de soldagem
Ar + 20 – 30% N ₂	-----	Idem N ₂ , mas melhor que 100% N ₂
Ar – 1 – 2% O ₂	Ligeiramente Oxidante	Aços inoxidáveis e algumas ligas de Cu
Ar + 3 – 5% O ₂	Oxidante	Aços carbono e alguns aços de baixa liga
CO ₂	Oxidante	Aços carbono e alguns aços de baixa liga
Ar + 20 – 50% CO ₂	Oxidante	Aços
Ar + CO ₂ + O ₂	Oxidante	Aços

Fonte: Marques (2009)

O potencial de ionização é uma característica fundamental dos gases de proteção. Este potencial corresponde à energia mínima necessária para liberar elétrons. Assim, quanto maior o potencial de ionização de um gás, maior será a energia necessária para estabelecer e manter o arco elétrico.

2.5.7.1. Proteção gasosa na soldagem duplo arame

Segundo Groetelaars (2005), o desempenho dos gases de proteção na soldagem com duplo arame é semelhante ao processo com um único arame. Estudos realizados por Dilthey *et. al* (1998) mostram que, para aços carbono no processo GMAW-DW, um aumento no teor

de CO₂ (superior a 18%) em misturas com argônio aumenta a penetração lateral no perfil do cordão, deixando-o mais simétrico.

2.6. Metalurgia da Soldagem

2.6.1. Considerações iniciais

O processo de soldagem causa alterações localizadas e bruscas no material trabalhado, podendo provocar mudanças estruturais e nas propriedades dos materiais (MODENESI *et al* 2012).

Durante a soldagem, a temperatura do material próximo à solda atinge valores que podem modificar a microestrutura do material. Essas mudanças dependem do teor de elementos de liga, espessura da chapa, metal de adição utilizado, configurações da junta, método de soldagem utilizado e habilidade do soldador (BARBOSA, 2007).

O estudo da metalurgia da soldagem visa o entendimento dos fenômenos físico-químicos e metalúrgicos responsável pela ocorrência de defeitos e a sua relação de dependência com os procedimentos de soldagem (FILHO, 2008).

2.6.2. Geometria do cordão

Na soldagem, duas ou mais peças metálicas são unidas para formar uma única peça.

Durante a soldagem a arco, as peças que serão unidas e o metal de enchimento são aquecidos a uma temperatura suficientemente elevada, fazendo com que ambos se fundam (CALLISTER, 2008).

A composição final do metal de solda é o resultado do metal de adição fundido com o metal base durante o processo (FORTES, 2005).

A Figura 2.12 ilustra as regiões de constituem uma junta soldada.

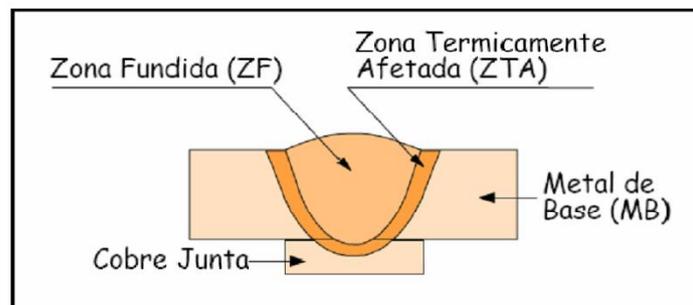


Figura 2.12 – Regiões que constituem a junta soldada.
Fonte: Modenesi *et al* (2012).

As regiões básicas de uma junta soldada podem ser descritas como:

a) **Metal base:** Região mais afastada da solda. Não foram alteradas pelo ciclo térmico e, portanto, não sofrem alterações em suas características físicas, químicas ou metalúrgicas.

b) **Zona Termicamente Afetada (ZTA):** Região do metal que, embora não fundida, sofre alterações metalúrgicas em seu estado sólido como, por exemplo, o crescimento de grãos.

c) **Zona Fundida (ZF):** Região onde o material foi fundido durante o processo de soldagem.

Nesta região, parte do metal base e parte do metal de adição se fundem, formando a poça de fusão.

Segundo Modenesi *et. al* (2012), em muitos materiais, a solidificação do metal ocorre em um amplo intervalo de temperatura. Isso faz com que, em alguns casos, a composição do metal de adição difira bastante do metal base. Desse modo, a zona fundida pode apresentar as seguintes regiões:

- **Região misturada:** Composto da mistura completa do metal base e do metal de adição na poça de fusão. Abrange a maioria do cordão.
- **Região não misturada:** Região onde o metal de base fundido não se misturou com o metal de adição. Compreende uma fina camada adjacente a linha de fusão, sendo revelado metalograficamente apenas por reagentes especiais. Podem originar microtrincas.
- **Região parcialmente fundida:** Região de transição entre a ZTA e a ZF. Caracteriza-se pela soldagem parcial durante a soldagem, podendo ser fonte de microtrincas.

A Figura 2.13 ilustra as sub-regiões da zona fundida, sendo que A representa a região fundida, B a região parcialmente misturada e C a região não misturada.

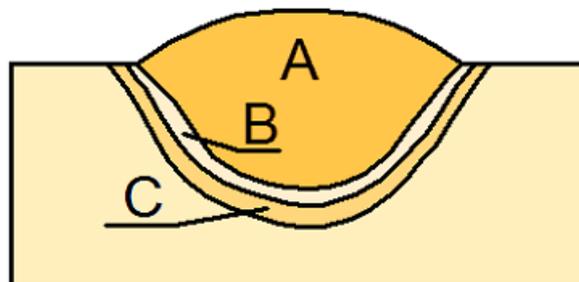


Figura 2.13 – Sub-regiões da ZF.
Fonte: Modenesi *et. al* (2012)

2.6.3. Diluição

Na soldagem por fusão, a diluição é a quantidade percentual de metal base que entra na composição da zona fundida (metal de solda), podendo variar de 5% a 100%. Em algumas aplicações especiais, a diluição se torna determinante no processo, podendo favorecer falhas durante a operação do equipamento, (ZEEMANN *et al*, 1992). A Figura 2.14 ilustra o esquema de diluição em seção transversal.

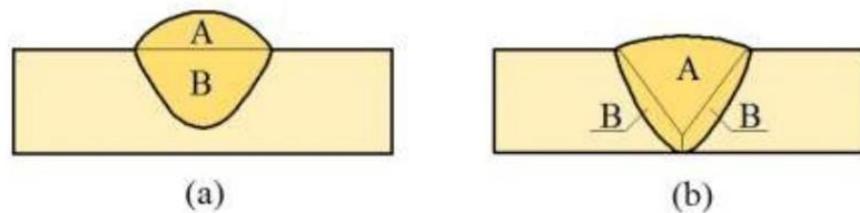


Figura 2.14 – Diluição medida na seção transversal em (a) Solda BOP e (b) Solda em topo.
Fonte: Marques (2009).

Desse modo, o coeficiente de diluição (δ) pode ser encontrado através da equação 2.1.

$$\delta = \frac{B}{A+B} \times 100 \quad (2.1)$$

Onde: δ = coeficiente de diluição

$A+B$ = área total do cordão de solda

B = área fundida do metal de solda

2.6.4. Características da zona termicamente afetada

As características da ZTA dependem do tipo do metal de base, do processo e do procedimento da soldagem. O ciclo térmico pode variar de acordo com o metal de base trabalhado. Para aços carbonos e aços baixa liga, a ZTA apresentará diversas regiões características, como ilustra a Figura 2.15.

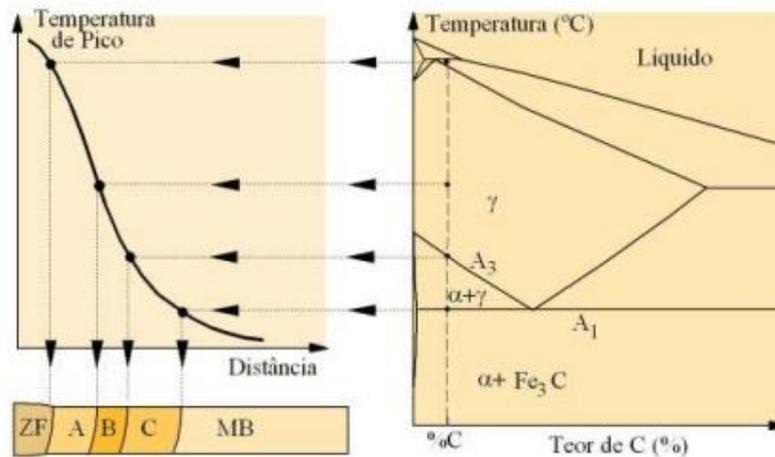


Figura 2.15 – Região da solda de um aço carbono.
Fonte: Modenesi *et al* (2012).

A. Região de crescimento de grão ou região grosseira: Região mais próxima à zona de fusão e submetida a uma temperatura de pico de aproximadamente 1200°C . Aqui, a estrutura sofre um grande crescimento de grão. Este crescimento varia de acordo com o tipo de aço utilizado e da energia de soldagem.

A microestrutura resultante nesta região dependerá do tamanho do grão austenítico e das transformações estruturais dentro do grão que depende da taxa de resfriamento da junta soldada.

Esta estrutura é caracterizada por uma estrutura grosseira, com placas de ferrita e podendo conter perlita, bainita ou martensita. Esta região tende a ser mais problemática da ZTA, podendo apresentar dureza elevada, perda de tenacidade e formação de trincas.

B. Região de refino de grão: Região aquecida a temperaturas comumente utilizadas na normalização dos aços, ou seja, de 900°C a 1000°C . Sua estrutura apresenta granulação fina, não sendo uma região problemática.

C. Região intercrítica: Região mais afastada do cordão de solda. A temperatura de pico é de aproximadamente 727°C (temperatura eutetóide). É caracterizada pela transformação parcial da estrutura original do metal de base. Nesta faixa de temperatura, somente uma parte do material é austenitizada e, portanto, alterado pelo ciclo térmico. Em caso de soldagem multipasses, constituintes de elevada dureza e baixa tenacidade podem se formar nessa região.

As regiões mais afastadas do cordão de solda, em que as temperaturas de pico atingem valores abaixo de 727°C , apresentam mudanças microestruturais quase imperceptíveis.

2.6.5. Microestrutura do aço baixo carbono

Para entender a relação entre o comportamento metalúrgico do metal de solda e os microconstituintes que surgem ao longo da solidificação, é preciso conhecer o diagrama ferro-carbono. Os aços baixo carbono e de baixa liga apresentam mudanças na estrutura cristalina similares a do ferro puro, apesar da diferença na composição química (BHADESHIA; HONEYCOMBE, 2006). No entanto, a zona fundida do aço baixo carbono e de baixa liga tende a apresentar uma microestrutura composta predominantemente por ferrita e perlita (MODENESI *et. al*, 2012). A Figura 2.16 mostra um diagrama de fases Fe-C.

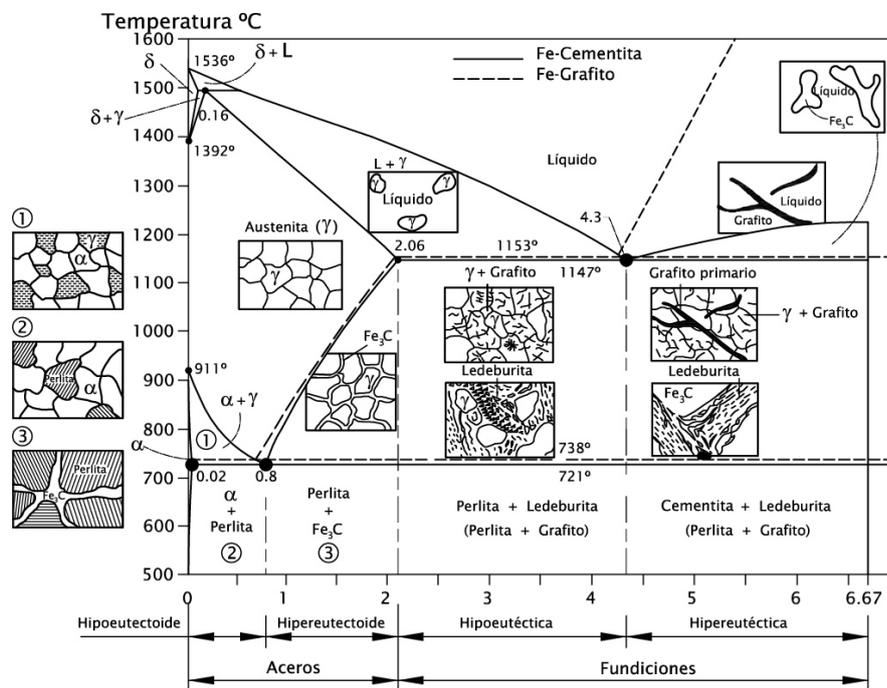


Figura 2.16 – Diagrama Fe-C.

Fonte: ThyssenKrupp

A terminologia do IIW (*International Institute Welding*), as fases presentes no aço carbono se classificam conforme o Tabela 2.2.

Tabela 2.2 – Fases presentes no aço carbono

Constituintes		Sigla	Descrição
Ferrita Primária	De Contorno de Grão	PF (G)	Veios de ferrita ou grãos poligonais associados aos contornos de grãos austeníticos prévios.
	Poligonal Intergranular	PF (I)	Grãos de ferrita normalmente poligonais, encontradas no interior dos grãos da austenita prévia, mas que apresentam dimensões superiores ao triplo da largura média das ripas da ferrita acicular ou da ferrita com segunda fase, que as circundam.
Ferrita Acicular		AF	Grãos de ferrita pequenos e não alinhados localizados no interior dos grãos austeníticos prévios. Uma região de AF comumente inclui placas isoladas de grande razão de forma.
Ferrita com Segunda Fase Alinhada		FS (A)	Duas ou mais ripas de ferritas paralelas. Quando existirem somente duas ripas, deve-se classificar como Ferrita com Segunda Fase Alinhada somente se sua razão de aspecto for maior que 4:1. Caso isto não se verifique, o constituinte deverá ser classificado como Ferrita Acicular ou Ferrita Poligonal.
Ferrita com Segunda Fase Não Alinhada		FS (NA)	Ferrita circundante (completamente) às microfases ou às ripas de Ferrita Acicular.
Agregado Ferrita Carboneto		FC	São constituídos por uma estrutura fina de ferrita e carbeto, incluindo perlita e ferrita com carbeto interfásicos. Constituinte formada fora do contorno de grão da austenita. Apresenta uma estrutura interna cuja resolução fica abaixo da obtida por microscopia ótica, formando áreas escurecidas.
Martensita		M	Colônias de martensita maiores que as lamina adjacentes de ferrita.
	Em Ripas	M (L)	Martensita de baixo carbono com subestrutura interna de ripas. Pacotes de martensita muito maiores que os pacotes de ferrita adjacentes. Podem se formar dentro dos grãos austeníticos anteriores.
	Maclada	M (T)	Martensita de alto carbono com austenita retida. Coloração marrom clara no ataque.

2.7. Planejamento experimental

O delineamento de experimentos ou *Design of experiments* (DOE) pode ser definido como uma abordagem sistemática e rigorosa para resolução de problemas de engenharia que se aplica princípios e técnicas para recolher dados, de modo a assegurar a validade da produção, defensável, e suportáveis conclusões de engenharia (NIST, 2000).

As técnicas estatísticas de experimentos são utilizadas para analisar, interpretar e apresentar as informações do planejamento experimental.

O delineamento de experimentos tem sido a ferramenta mais importante para se determinar as relações causa-efeito através de um modelo empírico. Esta ferramenta determina o menor número de experimentos necessários para a obtenção de resultados confiáveis.

O experimento planejado é uma série de testes que induzem mudanças nas variáveis de entrada de forma que se possa observar e identificar os efeitos nas respostas. O processo de transformação é representado pela combinação de máquinas, métodos, pessoas e outros recursos que transformam uma entrada em produtos acabados ou semiacabados, com características ou parâmetros específicos, como mostra a Figura 2.17.

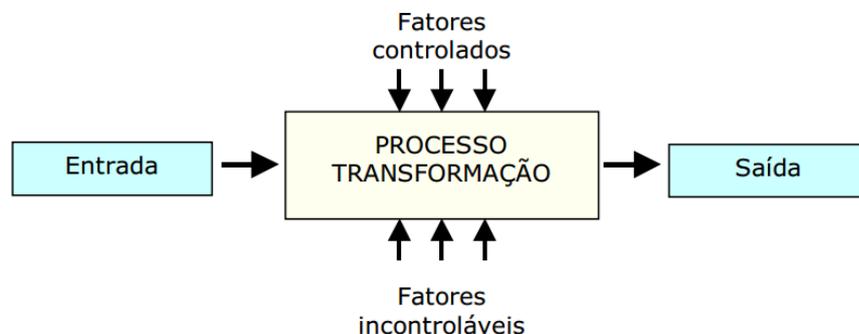


Figura 2.17 – Modelo geral de um sistema de transformação.
Fonte: MONTGOMERY (1997).

O projeto de experimentos se mostra como uma poderosa ferramenta que permite melhorar a qualidade e a produtividade, reduzindo o tempo de análise e os custos do processo.

Para que os resultados obtidos nos ensaios experimentais possam ser analisados por métodos estatísticos, o planejamento experimental também deve ser realizado através de métodos estatísticos para que, além de elaborar conclusões objetivas, possa avaliar os erros experimentais que afetam estes resultados (BUTTON, 2005).

Entre os objetivos do processo estão:

- Determinar quais variáveis são mais influentes nos resultados;

- Atribuir valores às variáveis influentes de modo a aperfeiçoar os resultados;
- Conferir valores às variáveis influentes de modo a minimizar a variabilidade dos resultados;
- Atribuir valores às variáveis influentes de modo a minimizar a influência de variáveis incontroláveis.

As principais vantagens do uso de técnicas estatísticas em um determinado processo são:

- Redução do número de ensaios sem prejuízo da qualidade da informação;
- Estudo simultâneo de diversas variáveis, separando seus efeitos;
- Determinação da confiabilidade dos resultados;
- Realização da pesquisa em etapas, num processo iterativo de acréscimo de novos ensaios;
- Seleção das variáveis que influem num processo com número reduzido de ensaios;
- Representação do processo estudado utilizando expressões matemáticas;
- Elaboração de conclusões a partir de resultados qualitativos.

De acordo com Coleman & Montgomery (1993) as atividades de planejamento que antecedem a experiência real são fundamentais para uma solução bem sucedida do problema de experimentos.

Segundo Montgomery (1997), antes de iniciar o experimento, é necessário que se constitua um planejamento. Além disso, durante a realização dos experimentos, o processo deve ser cuidadosamente monitorado para garantir que tudo seja realizado de acordo com os planos, pois a ocorrência de erros no procedimento experimental, muito possivelmente, invalidará seus resultados. A escolha adequada do tipo de planejamento utilizado em cada situação permite obter economia no número de experimentos, além de calcular com precisão as estimativas dos efeitos de interesse e da variabilidade do erro. O planejamento experimental deve ser preparado de forma a atender aos objetivos e restrições físicas e econômicas de cada experimento (PIZZOLATO, 2002).

De acordo com Juran & Godfrey (1998), os projetos experimentais podem ser classificados pelo número de fatores a serem estudados, pela estrutura utilizada (blocos, fatoriais, hierárquicos ou aninhados, ou para superfícies de resposta) e pelo tipo de informação que ele fornece (estimativa dos efeitos, da variância ou mapeamento empírico das Variáveis Respostas).

Dentre os tipos de delineamentos experimentais, destaca-se o planejamento fatorial, que permite avaliar simultaneamente o efeito de um grande número de variáveis através da realização de poucos ensaios experimentais, quando comparado aos processos uni variados (PERALTA-ZAMORA *et. at* 2005).

2.7.1. Planejamento fatorial

2.7.1.1. Conceitos básicos

Para entender a técnica do planejamento fatorial, alguns conceitos básicos precisam ser conhecidos:

- a) *Fatores de controle*: são aqueles alterados deliberadamente no experimento. Esses fatores são estimulados para que se possa avaliar o efeito produzido nas variáveis de resposta e assim, determinar os principais fatores do processo. Os fatores de controle podem ser classificados em quantitativos (tensão, corrente, velocidade, etc.) e qualitativos (posição do arame, diâmetro do arame, etc.).
- b) *Fatores de ruído*: são os fatores que influenciam nas variáveis de resposta.
- c) *Nível*: são as condições de operação dos fatores de controle investigados nos experimentos. Os níveis são identificados por: nível baixo (-1) e nível alto (+1). Para um melhor entendimento, Oliveira (1999) considera o menor valor o nível baixo e o maior valor o nível alto, quando os fatores ajustados são qualitativos.
- d) *Tratamentos*: representa cada combinação dos níveis de fatores de controle.
- e) *Efeito*: mudança ocorrida na resposta quando se muda do nível baixo (-) para o nível alto (+). Ou seja

$$efeito = \bar{R}_+ - \bar{R}_- \quad (2.1)$$

Sendo que:

\bar{R}_+ = media dos valores de resposta obtidos com valores altos do fator

\bar{R}_- = media dos valores de resposta obtidos com valores baixos do fator

- f) *Efeito principal*: é a diferença media analisada na resposta quando se muda o nível do fator de controle pesquisado. Este efeito pode ser representado por:

$$efeito\ principal = 2 \frac{(\sum y^+ - \sum y^-)}{b^k} \quad (2.2)$$

Sendo que:

y = media dos efeitos individuais da medida, (+) e (-)

b^k = número total de experimentos no planejamento

- g) *Efeitos de interação*: é a metade da diferença entre os efeitos principais de um fator nos níveis de outro fator;
- h) *Modelo estatístico*: modelo do tipo $y = b_0 + b_1x_1$, sendo b_0, b_1, \dots, b_n efeitos de cada fator na resposta;
- i) *Matriz de experimentos*: é onde são incluídos os fatores de controle, os níveis e tratamento dos experimentos.
- j) *Blocos*: é a técnica utilizada para controlar e avaliar a variabilidade produzida pelos fatores (controlados ou não) dos experimentos.
- k) *Erro Experimental*: é a variação de resultados que pode ocorrer de ensaio para ensaio. Este erro é proveniente de condições de ensaios incontrolláveis. A existência desse erro caracteriza a variável de resposta como aleatória, que pode ser "discreta", se apresentar um fenômeno finito de valores possíveis, ou "contínua" se apresentar-se dentro de um conjunto de valores (BUTTON, 2005).
- l) *Erro padrão para os efeitos*: erro na determinação dos efeitos. Pode ser calculado da seguinte maneira:

$$\text{erro padrão do efeito} = \frac{s}{\sqrt{2^{k-1}}} \quad (2.3)$$

Sendo:

s = erro da medida (desvio padrão)

k = número de fatores experimentais no planejamento fatorial.

De acordo com Singla et al (2010), o planejamento fatorial deve responder as seguintes perguntas:

- Quais fatores devem ser incluídos?
- Quantos níveis de cada fator devem ser incluídos?
- Como os níveis dos fatores devem ser espaçados?
- Quantas unidades experimentais devem ser selecionadas para cada condição de tratamento?
- Podem os efeitos de interesse primário ser estimados de forma adequada a partir dos dados experimentais obtidos?

Para a realização dos cordões de solda, é necessário que se estabeleça um plano estratégico para coordenar as atividades que serão realizadas. Este plano, segundo Montgomery (1997) deve seguir os seguintes passos:

- 1) *Definição dos objetivos do experimento*: nesta fase, se definem os problemas dos produtos e processos de fabricação, os objetivos do experimento, além de selecionar uma equipe responsável pelas atividades do experimento.
- 2) *Parâmetros do experimento*: esta fase consiste na coleta de informações técnicas do produto ou do processo de fabricação, ou seja, ter conhecimento de todos os fatores de controle, fatores de ruído, níveis de ajuste e variáveis de resposta.
- 3) *Seleção dos fatores de controle e das variáveis de respostas*: fase onde são selecionados os fatores de controle, as faixas de variação dos níveis de ajustagem desses fatores e as respostas do experimento. Nesta fase, também são definidos o método de medição dos fatores de controle e a escala numérica que será utilizada para a avaliação das respostas.
- 4) *Seleção da matriz experimental*: ao selecionar a matriz de experimentos, deve se levar em conta o número de fatores de controle, o número de níveis e os fatores não controláveis do processo.
- 5) *Realização do experimento*
- 6) *Análise de dados*: o comportamento das variáveis e a relação entre elas para estimar os efeitos produzidos nas respostas são observados através da aplicação de conceitos estatísticos.
- 7) *Interpretação dos resultados*: são extraídas as conclusões práticas dos resultados e possíveis recomendações de melhorias.

Em casos onde se deseja investigar o efeito provocado nas respostas dos experimentos por mais de um fator de controle em que cada fator possui mais de um nível, é recomendável o uso do planejamento fatorial completo (2^k) ou fracionado (2^{k-p}), onde p é a fração desejada do experimento (COLOMBARI, 2004).

2.7.1.2. Planejamento fatorial completo 2^k

No planejamento fatorial completo 2^k , o número de experimentos a serem realizados é igual ao número de níveis experimentais elevados ao número de fatores, cobrindo todo o espaço experimental (DIAS *et.al.*, 2010). Para Neves *et. al* (2002), este tipo de planejamento é o mais simples de ser realizado, pois cada fator k está presente em apenas 2 níveis. Assim, em um planejamento com 2 níveis (alto e baixo) para 3 fatores (2^3), apenas 8 experimentos serão realizados. Após a realização dos testes, os efeitos principais e a interação dos fatores

investigados são determinados e interpretados, indicando as melhores condições experimentais do processo.

Montgomery (1997) ilustra o procedimento experimental 2^k da seguinte maneira:

Considere um experimento com três fatores (x_1, x_2 e x_3). Cada um desses fatores foi testado com dois níveis (-1 e +1), onde -1 representa o menor nível e +1 representa o maior nível. Então, a matriz experimental genérica para o procedimento 2^3 é representada pela Tabela 2.3. A coluna y_i indica as respostas de cada ensaio. A ordem dos tratamentos está definida aleatoriamente.

Tabela 2.3 – Matriz experimental genérica para o procedimento 2^3

N ° de testes	Fatores de Controle			Ordem do teste	Resposta (y_i)
	x_1	x_2	x_3		
1	-1	-1	-1	6	y_1
2	+1	-1	-1	8	y_2
3	-1	+1	-1	1	y_3
4	+1	+1	-1	2	y_4
5	-1	-1	+1	5	y_5
6	+1	-1	+1	3	y_6
7	-1	+1	+1	4	y_7
8	+1	+1	+1	7	y_8

Para x_1 , a coluna será definida pela combinação dos níveis -1, +1, -1, +1, ..., ou seja, o sinal é alterado em grupos de $2^0 = 1$.

Para x_2 , a combinação de níveis será -1, -1, +1, +1, -1, -1, +1, +1, ...ou seja, sinal é alterado em grupos de $2^1 = 2$.

Para x_3 , a coluna será definida pela combinação -1, -1, -1, -1, +1, +1, +1, +1, ..., ou seja, o sinal dessa coluna altera em grupos de $2^2 = 4$.

Para x_4 , o sinal altera em grupos de oito, ou seja, $2^3 = 8$.

O procedimento seguirá da mesma maneira para x_5, x_6, \dots, x_k . Para x_k , o sinal altera em grupos de $2^{(k-1)}$, ou seja, $2^{(k-1)}$ vezes (-1), seguido de $2^{(k-1)}$ vezes (+1).

Ainda de acordo com Montgomery (1997), o modelo matemático para o planejamento fatorial 2^3 é demonstrado pela equação 2.2.

$$y_{ijk} = \mu + \tau_i + \beta_j + \gamma_k + (\tau\beta_{ij}) + (\tau\gamma_{ik}) + (\beta\gamma_{jk}) + (\tau\beta\gamma_{ijk}) + \varepsilon_{ijk} \quad (2.4)$$

Sendo que:

μ = média dos resultados

τ_i = efeito principal do fator x_1

β_j = efeito principal do fator x_2

γ_k = efeito principal do fator x_3

$\tau\beta_{ij}$ = efeito da interação entre x_1 e x_2

$\tau\gamma_{ik}$ = efeito da interação entre x_1 e x_3

$\tau\beta\gamma_{ijk}$ = efeito da interação entre x_1, x_2 e x_3

ε_{ijk} = erro experimental

O autor também descreve um método genérico que pode ser usado para avaliar os efeitos principais e de interações entre os fatores. Esse método é apresentado pela equação 2.3.

$$E_i = \frac{\sum y_i \times x_i}{(N/2)} \quad (2.5)$$

Onde:

E_i = efeito estimado

$\sum y_i \times x_i$ = somatória da multiplicação das respostas y_i pela coluna x_i

N = número total de observações

Assim, o efeito de interação pode ser determinado da seguinte maneira: considere o efeito de interação E_{12} da matriz apresentada na Tabela 2.1. As colunas dos fatores x_1 e x_2 serão multiplicadas entre si. Em seguida, os valores ± 1 associados à coluna x_1x_2 serão utilizados para estimar o efeito de interação.

As réplicas dos experimentos são importantes para determinar o erro experimental na resposta obtida. No entanto, devido às restrições financeiras, técnicas ou de tempo, o experimento fatorial pode ser realizado sem repetições. Neste caso, de acordo com Montgomery & Runger (2012), existe um método de replicar alguns pontos do fatorial 2^k , permitindo uma estimativa independente do erro a ser obtido. Este método consiste em adicionar pontos centrais ao planejamento 2^k . Esses consistem em n_c réplicas corridas no

ponto $x_i = 0$ ($i = 1, 2, \dots, k$). A principal razão para adicionar réplicas dos pontos centrais é que esses não repercutem nas estimativas usuais dos efeitos em um planejamento 2^k . Porém, neste caso, os k fatores devem ser considerados quantitativos.

Montgomery & Runger (2012) ilustram a abordagem das réplicas dos pontos centrais da seguinte maneira: Considere um planejamento 2^2 com uma observação em cada um dos pontos fatoriais $(-, -), (+, -), (-, +)$ e $(+, +)$ e n_c observações nos pontos centrais $(0,0)$, como mostra a Figura 2.18.

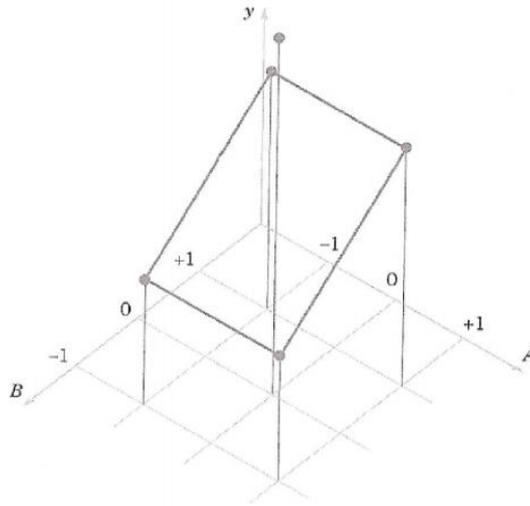


Figura 2.18 – Planejamento 2^2 com pontos centrais

Fonte:Montgomery & Runger (2012).

Sendo \bar{y}_F a média das quatro corridas nos quatro pontos fatoriais e \bar{y}_C a média nas n_c corridas no ponto central. Se a diferença $\bar{y}_F - \bar{y}_C$ for pequena, os pontos centrais estarão no plano ou próximo ao plano passando através dos pontos fatoriais, não havendo, portanto uma curvatura. Entretanto, se $\bar{y}_F - \bar{y}_C$ for grande, então a curvatura estará presente. A soma dos quadrados, com um único grau de liberdade, para a curvatura é dado por:

$$SQ_{Curvatura} = \frac{n_F n_C (\bar{y}_F - \bar{y}_C)^2}{n_F + n_C} = \left(\frac{\bar{y}_F - \bar{y}_C}{\sqrt{\frac{1}{n_F} + \frac{1}{n_C}}} \right)^2 \quad (2.6)$$

Onde n_F é o número de pontos do planejamento.

Deste modo, quando são adicionados pontos centrais ao planejamento 2^k , tem-se o seguinte modelo:

$$Y = \beta_0 + \sum_{j=1}^k \beta_j x_j + \sum_{i < j} \beta_{ij} x_i x_j + \sum_{j=1}^k \beta_{jj} x_j^2 + \epsilon \quad (2.7)$$

Onde β_{jj} são os efeitos quadráticos no modelo fatorial.

2.7.1.3. Representação Gráfica

Os efeitos e interação do planejamento fatorial podem ser analisados por meio de gráficos, como por exemplo, o gráfico de Pareto e o gráfico de contorno.

O gráfico de Pareto é utilizado para identificar quais dos efeitos dos processos são mais significativos, de forma a concentrar os esforços de melhoria em áreas onde as maiores melhorias podem ser feitas. A Figura 2.19 representa um gráfico de Pareto de efeitos.

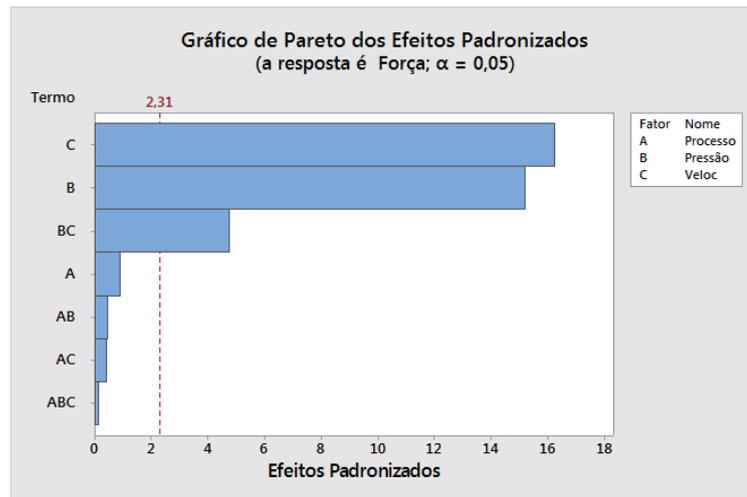


Figura 2.19 – Gráfico de Pareto de efeitos

O gráfico de Pareto mostra o valor absoluto dos efeitos e desenha uma linha de referência no gráfico. Qualquer efeito que se estende para além dessa linha de referência é potencialmente importante.

Alpha (α) é o nível de significância adotado, isto é, o erro estatístico que é o inverso do nível de confiança. Portanto, um valor de α de 5% implica em um nível de confiança de 95%.

A escala do eixo x depende da existência de um termo de erro:

- Se não houver um termo de erro, usa-se o Pseudo Erro Padrão (PSE) de Lenth. O pseudo erro padrão é baseado no conceito de efeitos escassos, que pressupõe que a variação nos menores efeitos é causada por erros aleatórios. PSE de Lenth é utilizado no cálculo de um valor crítico para os efeitos quando não existem réplicas. Baseia-se no fato de que o desvio padrão de uma amostra a partir de um $N(0, \sigma^2)$ de distribuição pode ser estimada como $1,5 \times$ mediana (valores absolutos). No caso de alguns efeitos não são nulos, um refinamento é excluir efeitos que excedam 2,5 vezes essa estimativa e recalculá-los. Para encontrar o valor crítico para o efeito, o PSE é multiplicado pelo valor crítico apropriado para t com $m/3$ graus de liberdade, em que m é o número de efeitos a ser avaliado.

- Se houver um termo de erro, uma linha de referência t deverá ser traçada, onde t é o quartil $(1 - \alpha/2)$ de uma distribuição t com graus de liberdade iguais aos graus de liberdade do termo de erro. Geralmente, usa-se $\alpha = 0,05$ por padrão.

O gráfico de contorno é usado para explorar a relação potencial entre três variáveis. Os gráficos de contorno exibem a relação tridimensional em apenas duas dimensões, com fatores x e y (preditoras) representadas graficamente nas escalas x e y e valores de respostas apresentados por contornos. Deste modo, sabe-se quais parâmetros devem ser utilizados para cada resposta desejada. A Figura 2.20 mostra um exemplo de um gráfico de contorno.

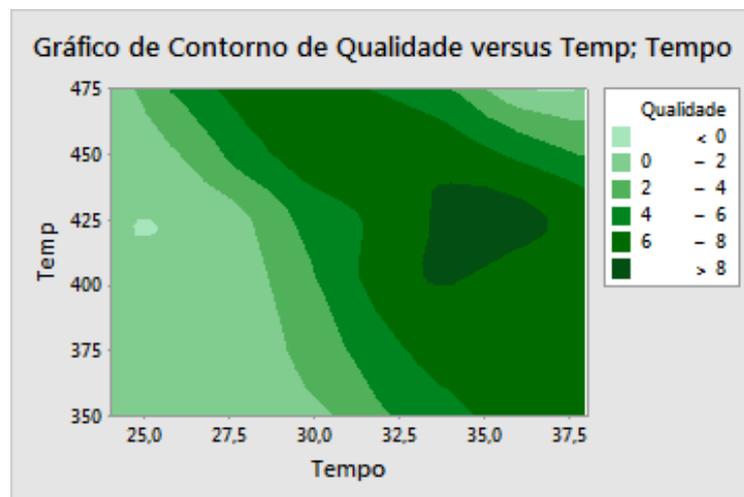


Figura 2.20 – Exemplo de gráfico de contorno.

2.7.1.4. Planejamento Experimental em Soldagem:

A soldagem pode ser considerada como um processo de múltiplas entradas e saídas. A qualidade de uma solda é influenciada diretamente pelos parâmetros de entrada durante o processo. No entanto, o controle desses parâmetros de entrada aparece como um problema para se obter uma boa junta soldada, com a geometria e a qualidade desejada (BENYOUNIS & OLABI, 2007).

A solda deve atender os critérios de aceitação que se originam a partir da necessidade de garantir a qualidade da solda e a integridade mecânica das peças soldadas. A variabilidade na qualidade da solda é inerente devido ao erro do operador, a contaminação das peças soldadas e distúrbios causados por variações na geometria e na posição da pistola de solda. Por essas razões, um método para selecionar um processo de soldagem ótimo é necessário para melhorar a qualidade da solda e para aumentar a probabilidade de que cada solda satisfaça os critérios de aceitação desejados (MURRAY, 2002).

A seleção dos parâmetros ideais é importante, pois os procedimentos ótimos garantem a qualidade da solda e a confiabilidade do processo.

Gupta & Parmar (1989) utilizaram a técnica fatorial fracionada para determinar os efeitos principais e de interação usando diferentes combinações de parâmetros de soldagem. Além disso, os autores desenvolveram modelos matemáticos para prever as dimensões da zona soldada.

Murugan & Parmar (1994) usaram uma técnica fatorial com quatro fatores e cinco níveis para prever a geometria do cordão de solda. Harris & Smith (1983) utilizaram a técnica fatorial para provar que todas as variáveis do processo agiram como principais parâmetros do processo para controlar a qualidade de depósito do material.

Sampath (2005) utilizou o planejamento fatorial completo 2^3 para avaliar o desempenho de um lote de eletrodos de solda e concluiu que essa abordagem reduz muito o risco inerente do desenvolvimento das especificações do eletrodo.

Rodrigues *et al* (2008) desenvolveram modelos matemáticos através da metodologia da superfície de respostas para o controle da penetração e convexidade do cordão de solda. Esses modelos mostraram-se adequados e permitiram prever as condições geométricas do cordão.

Kannan & Yoganandl (2010) desenvolveram um modelo matemático capaz avaliar a influência dos parâmetros de soldagem na geometria do cordão pelo processo GMAW convencional em aços inoxidáveis austeníticos.

Sen *et al* (2015) analisaram as correlações entre os parâmetros de soldagem do processo GMAW-DP (duplo arame com corrente pulsada) e a geometria do cordão através da metodologia de superfície de resposta. Além disso, os autores elaboraram três modelos estatísticos de segunda ordem utilizando os resultados obtidos para prever os parâmetros de soldagem, atingindo resultados com razoável precisão.

Miguel *et.al.* (2015) avaliaram, através do método de superfície de resposta com base no projeto de experimentos utilizando liga de alumínio, através do processo GMAW convencional, quais valores de penetração tendem a manter a ZTA dentro dos padrões aceitáveis e quais parâmetros afetam este resultado.

O desenvolvimento de equações desenvolvido por Adak *et al* (2015) para analisar a geometria do cordão de solda, foi aprimorado para prever a estrutura dos grãos, obtendo resultados bastante satisfatórios.

3. PROCEDIMENTO EXPERIMENTAL

3.1. Materiais Utilizados

Neste trabalho foi utilizado o arame sólido ER70S-6 com 0,8 mm e 1,0 mm de diâmetro.

A Tabela 3.1 apresenta a composição do arame utilizado.

Tabela 3.1 – Composição química do arame ER70S-6.

Eletrodo	C (%)	Si (%)	Mn (%)
ER70S-6	0,08	0,90	1,50

Fonte: Esab (2015)

O material selecionado para a confecção dos corpos-de-prova foi o aço A-36, muito usado na indústria metal-mecânica e naval, com dimensões de 200 mm de comprimento, 150 mm de largura e 3/8 polegadas de espessura. A composição química do aço ASTM A-36 está representada na Tabela 3.2.

Tabela 3.2 – Composição química prevista para o aço ASTM A-36.

C (%)	Si (%)	Mn (%)	Ni (%)	Mo (%)	P (%)	S (%)	Cu (%)	Al (%)	V (%)
0,17	0,23	0,62	0,01	0,013	<0,027	<0,018	<0,3	<0,1	<0,1

3.2. Preparação das Amostras

As soldas sobre chapas foram realizadas no LABSIT (Laboratório de Soldagem e Inovação Tecnológica) situado no CEFET - MG (Centro Federal de Educação Tecnológica de Minas Gerais) Campus VIII, na cidade de Varginha – MG.

O corte das chapas foi feito por plasma, utilizando a máquina *Hypertherm Powermax 85*, com corrente de 75 A, vazão de 5,2 bar e velocidade de 2,5 cm/s e o carro tartaruga *Straight Cutting Machine*, modelo SB1-30.

Os cordões de solda para análise foram realizados sobre chapas de aço (BOP), utilizando o processo GMAW-DW, no modo Tandem. A Figura 3.1 ilustra o esquema de solda realizada.

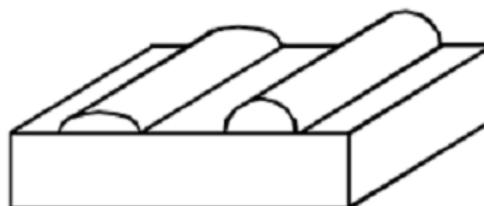


Figura 3.1– Esquema de solda realizada sobre chapa (BOP).

Para os cordões realizados nos processos DW utilizaram-se duas máquinas de solda idênticas a fim de estabilizar o processo.

3.3. Planejamento fatorial

Para que os ensaios fossem realizados de maneira econômica, propôs-se um planejamento fatorial completo (2^k) com dois níveis: baixo e alto e três fatores: tensão, corrente e velocidade de soldagem, além da adição de cinco pontos centrais, através do método de delineamento de experimentos (DOE). As variáveis do processo foram selecionadas de acordo com a indicação do fabricante dos arames (ESAB). As variações para cima e para baixo foram de aproximadamente 15%.

A Tabela 3.3 mostra os parâmetros usados no planejamento fatorial completo para os processos propostos.

Tabela 3.3 - Parâmetros usados para o planejamento fatorial completo para os processos propostos.

Consumível	Tensão (V)		Corrente (A)		Velocidade de Soldagem (cm/min)	
	Min.	Max.	Min.	Max.	Min.	Max.
Arame 1 0,8 mm	19,2	24	112	148	28	35
Arame 2 1,0 mm	18,7	22,4	127	172		

O Apêndice A apresenta os quadros com os planejamentos fatoriais completos para o processo proposto.

Para o processo DW, os dois arames estão energizados. Assim, o planejamento fatorial completo com arames de diâmetros diferentes contam com 5 fatores: 2 tensões, 2 correntes e apenas uma velocidade de soldagem, já que os arames são guiados pelo mesmo carro tartaruga, além da adição de cinco pontos centrais. A tabela 3.4 apresenta um resumo dos ensaios através deste processo.

Tabela 3.4 – Resumo dos testes realizados em solda sobre chapa utilizando duplo arame (DW) com duas fontes: Mestra e Escrava com potenciais isolados.

Consumíveis	Variáveis	Nível baixo	Nível alto	Planejamento Fatorial
Arame 1 0,8 mm (Mestra) + Arame 1 0,8 mm (Escrava)	Tensão	T_{1b}	T_{1a}	2^3 8 Ensaios + 5 pontos centrais
	Corrente	C_{1b}	C_{1a}	
	Velocidade de Soldagem	V_{1b}	V_{1a}	
Arame 2 1,0 mm (Mestra) + Arame 2 1,0 mm (Escrava)	Tensão	T_{2b}	T_{2a}	2^3 8 Ensaios + 5 pontos centrais
	Corrente	C_{2b}	C_{2a}	
	Velocidade de Soldagem	V_{2b}	V_{2a}	
Arame 1 0,8 mm (Mestra) + Arame 2 1,0 mm (Escrava)	Tensão 1	T_{1b}	T_{1a}	2^5 32 Ensaios + 5 pontos centrais
	Corrente 1	C_{1b}	C_{1a}	
	Tensão 2	T_{2b}	T_{2a}	
	Corrente 2	C_{2b}	C_{2a}	
	Velocidade de Soldagem	V_b	V_a	
Arame 2 1,0 mm (Mestra) + Arame 1 0,8 mm (Escrava)	Tensão 2	T_{2b}	T_{2a}	2^5 32 Ensaios + 5 pontos centrais
	Corrente 2	C_{2b}	C_{2a}	
	Tensão 1	T_{1b}	T_{1a}	
	Corrente 1	C_{1b}	C_{1a}	
	Velocidade de Soldagem	V_b	V_a	
Total				100 ensaios

Os planejamentos fatoriais não foram replicados devido ao número elevado de ensaios e às restrições financeiras. Ao invés disso, foram inseridos 5 pontos centrais em cada procedimento.

3.4. Parâmetros de soldagem

Os parâmetros fixos utilizados nos processos de soldagem DW são mostrados na Tabela 3.5.

Tabela 3.5 – Parâmetros fixos de soldagem para os processos DW.

Gás de Proteção: 92% CO ₂ + 8% Ar
Vazão do Gás: 10 L/min
DBCP: 15 mm
Polaridade: CC ⁺
Distância entre as tochas: 30 mm

3.5. Processos de Soldagem

A realização dos cordões foi executada utilizando duas máquinas idênticas Smashweld 408, fabricadas pela Esab, um banco de testes com um carro tartaruga, que controla a velocidade de soldagem, acoplado a um dispositivo que ajusta a altura das tochas em relação às chapas a serem soldadas. A Figura 3.2 apresenta a bancada de ensaios.



Figura 3.2 – Bancada de testes

Sendo que:

- 1 – Corpo de Prova
- 2 – Tochas
- 3 – Carro tartaruga
- 4 – Arames
- 5 – Cilindro de gás de proteção
- 6 – Fontes ESAB Smashweld 408

Os cordões foram realizados utilizando o método tandem. Para a realização dos mesmos, as tochas foram alinhadas paralelamente como mostra a Figura 3.3.



Figura 3.3 – Ajuste das tochas para o processo DW.

3.6. Análise da Geometria dos cordões

Para a análise dos cordões, os corpos de prova foram cortados, lixados, polidos e atacados com uma solução de nital 4% durante aproximadamente 5 segundos.

Para a ampliação dos cordões de solda, foi utilizado o Estereoscópio Olympus, modelo SZ61, com zoom de 6,7 – 45X. Através do software Análisis FIVE, foi possível medir os parâmetros geométricos dos cordões conforme apresentado na Figura 3.4. O aumento das imagens variou entre 6,5 e 20 vezes, dependendo das dimensões geométricas de cada cordão.



Figura 3.4 – Análise das propriedades geométricas dos cordões de solda.

Com a ajuda do software, foi possível medir os parâmetros: altura, largura, penetração e área dos cordões de solda e assim encontrar os parâmetros ótimos de cada processo.

3.6.1. Influência das variáveis na geometria do cordão

As variáveis de soldagem (tensão, corrente e velocidade de soldagem) influenciam diretamente a geometria do cordão de solda. Utilizando o software MINITAB, foi possível realizar diagramas de Pareto e de contorno e assim verificar quais fatores exerceram maiores influências nas geometrias dos cordões em cada processo realizado. Os resultados dos diagramas foram comparados aos resultados apresentados nas tabelas do Anexo C possibilitando um melhor entendimento.

3.7. Análise Metalográfica

A análise metalográfica foi realizada nos cordões ótimos de cada processo. O ataque para a realização da micrografia foi feito com uma solução de nital 4% por aproximadamente 5 segundos. O microscópio utilizado para ampliar as imagens foi Olympus, modelo BX41M-LED como ilustra a Figura 3.5.



Figura 3.5 – Microscópio utilizado para micrografia dos cordões.

Para a análise microscópica das amostras soldadas, foram avaliadas as regiões de metal base, zona fundida e ZTA (zona termicamente afetada) de cada chapa soldada. A Figura 3.6 apresenta as três regiões analisadas de um cordão de solda.

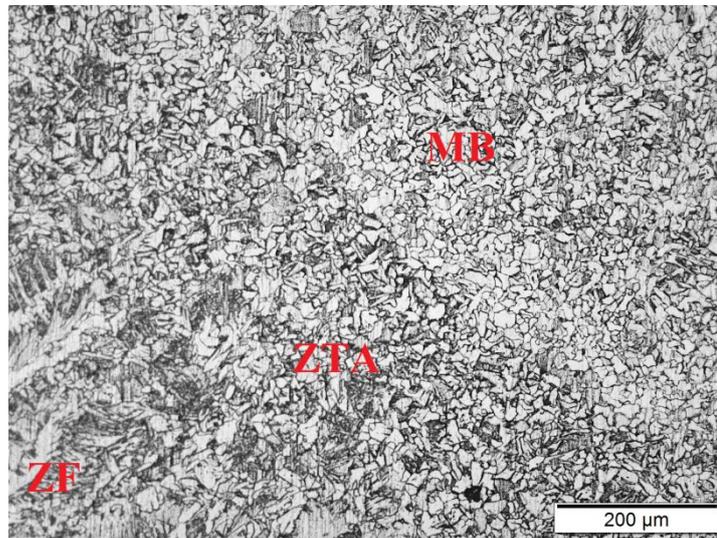


Figura 3.6 – Áreas do cordão de solda. MB – Metal base, ZTA – zona termicamente afetada, ZF – zona fundida.

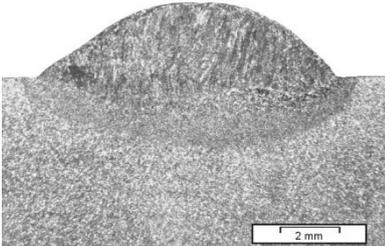
Foi realizado o ensaio de microdureza foi realizado nos cordões cujos parâmetros foram considerados ótimos. Pra isso, foi utilizado o Microdurômetro Digimess, modelo Microhardness Tester HV – 1000, com uma carga de 0,5N.

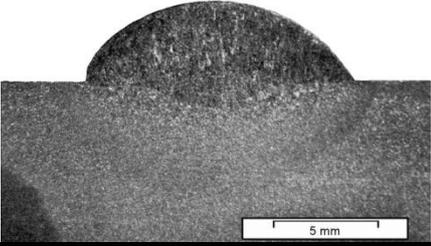
4. RESULTADOS E DISCUSSÕES

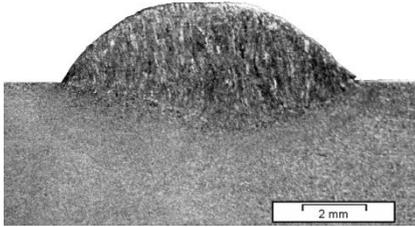
4.1. Análise da Geometria dos cordões

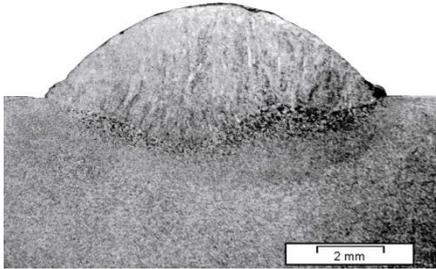
De acordo com as a análise geométrica mostrada Apêndice C, os cordões que tiveram uma penetração, uma largura e uma altura adequadas em relação a espessura da chapa, influenciando positivamente na qualidade, são considerados cordões ótimos. A Tabela 4.1 apresenta as macrografias dos cordões que contém os parâmetros ótimos para o processo GMAW-DW. Além disso, o Anexo B apresenta todas as superfícies dos cordões de solda realizados.

Tabela 4.1 – Corpos de prova com parâmetros ótimos para o processo DW.

Arame 1 – 0,8mm (Mestra) + Arame 1 – 0,8mm (Escrava)			
Imagem	Variáveis		
	Tensão (V)	Corrente (A)	Velocidade de Soldagem
	24	148	28
	Parâmetros (mm)		
	Altura	Largura	Penetração
	2,547	10,109	1,289

Arame 2 – 1,0mm (Mestra) + Arame 2 – 1,0mm (Escrava)			
Imagem	Variáveis		
	Tensão (V)	Corrente (A)	Velocidade de Soldagem
	22,4	172	28
	Parâmetros (mm)		
	Altura	Largura	Penetração
	3,864	12,880	1,320

Arame 1 – 0,8mm (Mestra) + Arame 2 – 1,0mm (Escrava)					
Imagem	Variáveis				
	Tensão (V)		Corrente (A)		Velocidade de Soldagem
	T ₁	T ₂	C ₁	C ₂	35
	24	22,4	148	127	
	Parâmetros (mm)				
	Altura	Largura		Penetração	
	2,497	9,318		1,563	

Arame 2 – 1,0mm (Mestra) + Arame 1 – 0,8mm (Escrava)					
Imagem	Variáveis				
	Tensão (V)		Corrente (A)		Velocidade de Soldagem
	T ₂	T ₁	C ₂	C ₁	35
	22,4	24,0	172	112	
	Parâmetros (mm)				
	Altura	Largura		Penetração	
	2,801	10,069		1,451	

4.1.1. Influência das variáveis na geometria dos cordões

As variáveis de soldagem (tensão, corrente e velocidade de soldagem) influenciam diretamente a geometria do cordão de solda. Utilizando o software MINITAB, foi possível construir diagramas de Pareto de efeitos, de efeitos principais e efeito das interações e

verificar quais fatores exerceram maiores influências nas geometrias dos cordões em cada processo realizado.

As figuras representam os diagramas de Pareto de efeitos, de efeitos principais e efeito das interações para cada processo de soldagem utilizado.

- **Arame 1 – 0,8mm (mestre) + arame 1 – 0,8mm (escravo)**

Para os testes realizados com Arame 1 – 0,8mm (mestre) + arame 1 – 0,8mm (escravo), verifica-se nas Figuras 4.1 a 4.9 a influência da tensão, corrente e velocidade de soldagem na geometria dos cordões.

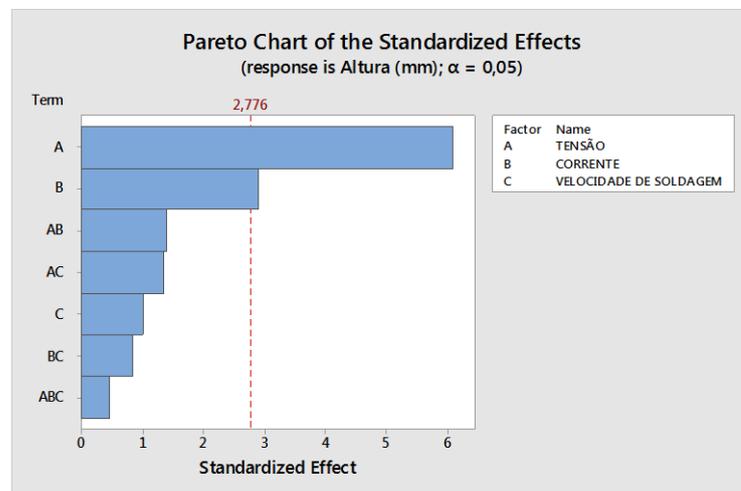


Figura 4.1 – Influência das variáveis sobre a altura dos cordões.

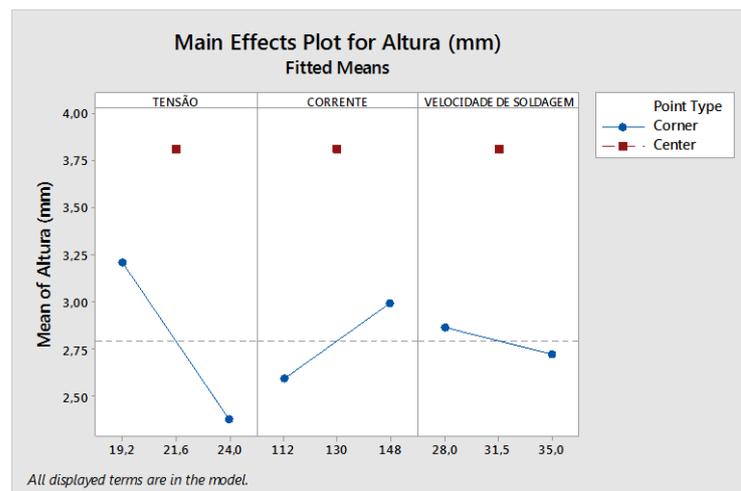


Figura 4.2 – Influência dos efeitos principais sobre a altura dos cordões

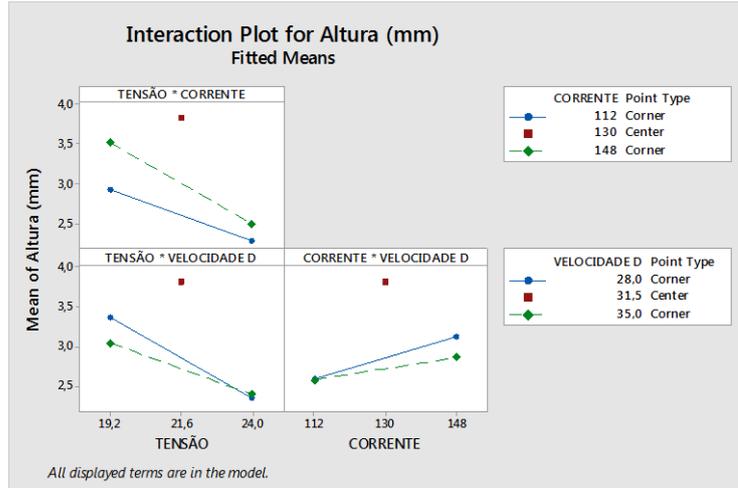


Figura 4.3 – Influência dos efeitos das interações sobre a altura dos cordões.

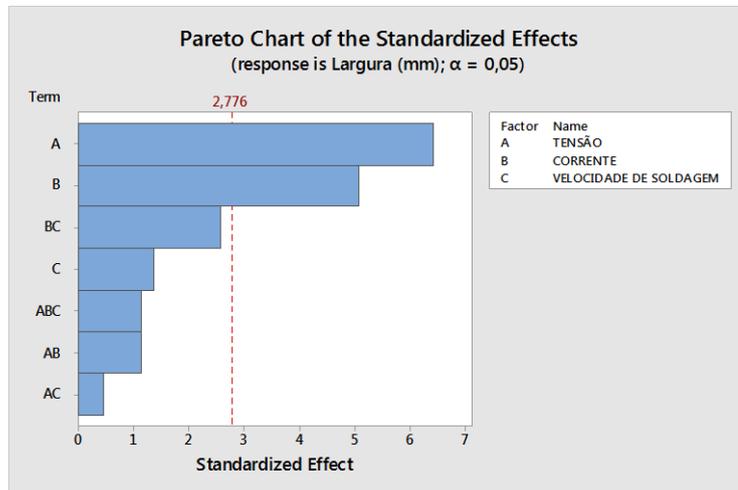


Figura 4.4 – Influência das variáveis sobre a largura dos cordões.

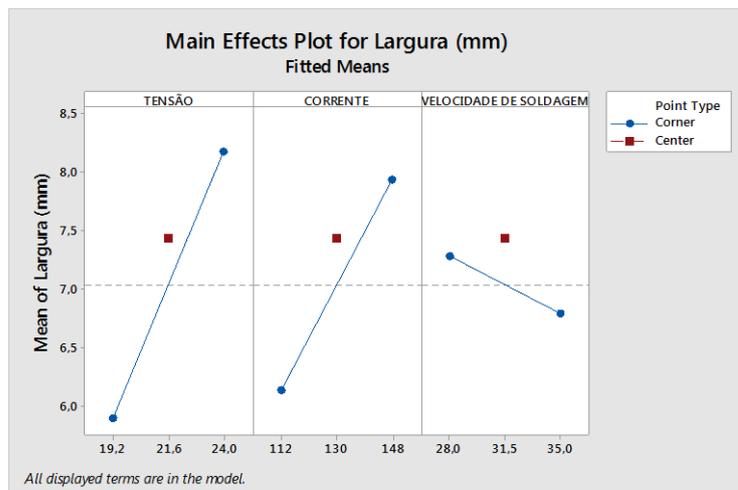


Figura 4.5 – Influência dos efeitos principais sobre a largura dos cordões

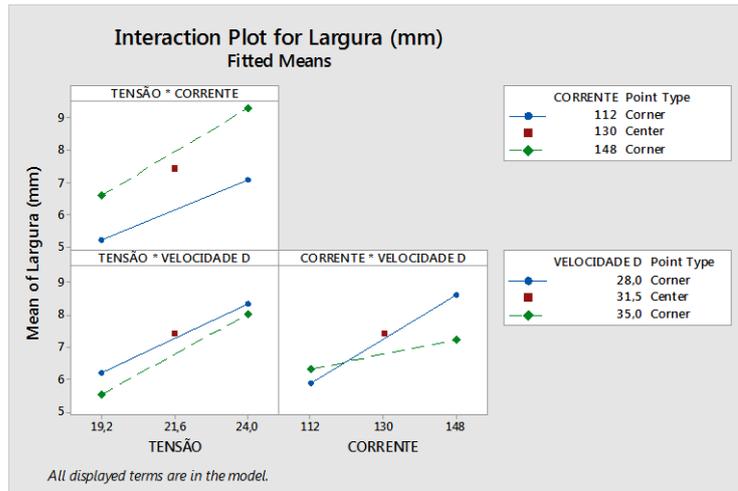


Figura 4.6 – Influência dos efeitos das interações sobre a largura dos cordões.

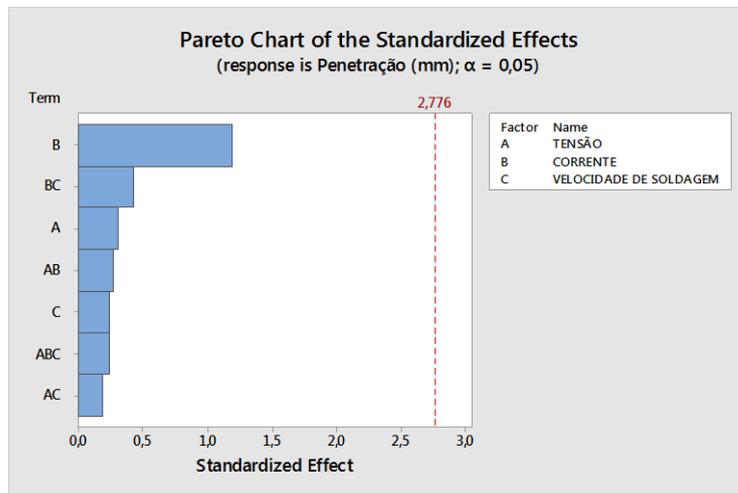


Figura 4.7 – Influência das variáveis sobre a penetração dos cordões.

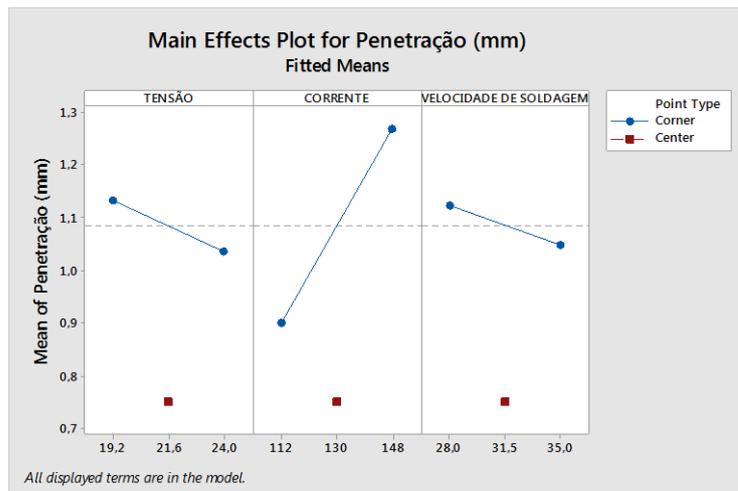


Figura 4.8 – Influência dos efeitos principais sobre a penetração dos cordões.

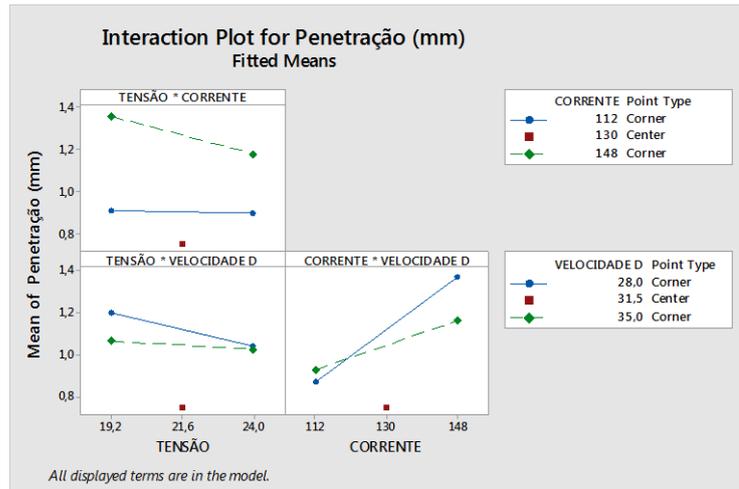


Figura 4.9 – Influência dos efeitos das interações sobre a penetração dos cordões.

A análise dos diagramas de Pareto de efeitos mostrou que a tensão de soldagem exerce grande influência na altura e na largura dos cordões, enquanto a penetração foi influenciada principalmente pela corrente de soldagem, ainda que não tenha sido significativa. Como a variação na velocidade da soldagem foi pequena, a mesma não exerceu influência significativa nos resultados.

Os aumentos da tensão e da velocidade de soldagem diminuíram a altura dos cordões, enquanto que o aumento da corrente de soldagem gerou cordões mais altos.

O cruzamento entre as linhas nos gráficos de interações mostrou que as mesmas exerceram influência sobre a geometria dos cordões embora essas não tenham sido significativas.

- **Arame 2 – 1,0mm (mestre) + arame 2 – 1,0mm (escravo)**

Para os testes realizados com Arame 2 – 1,0mm (mestre) + arame 2 – 1,0mm (escravo), pode-se observar nas Figuras 4.10 a 4.18 a influência da tensão, corrente e velocidade de soldagem na geometria do cordão de solda.

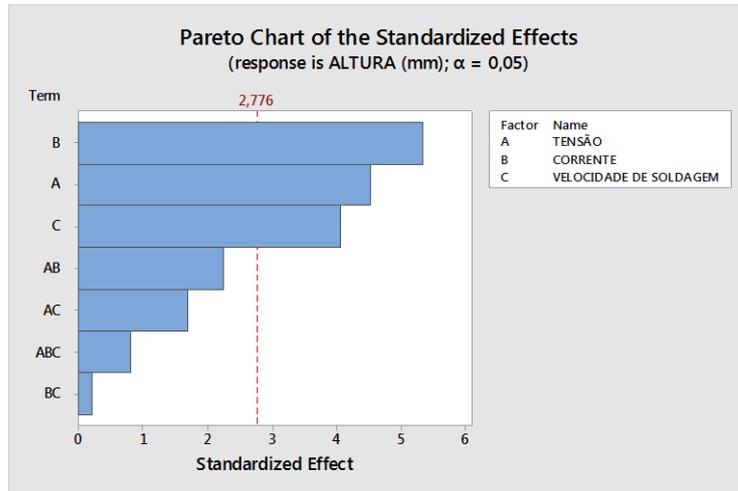


Figura 4.10 – Influência das variáveis sobre altura dos cordões.

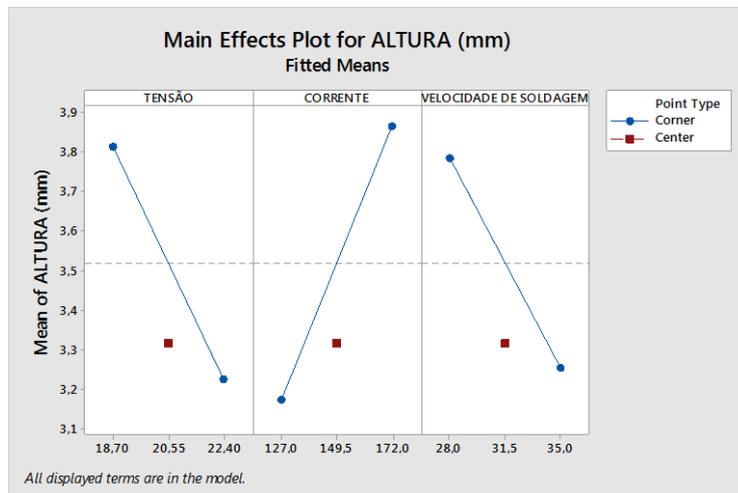


Figura 4.11 – Influência dos efeitos principais sobre a altura dos cordões.

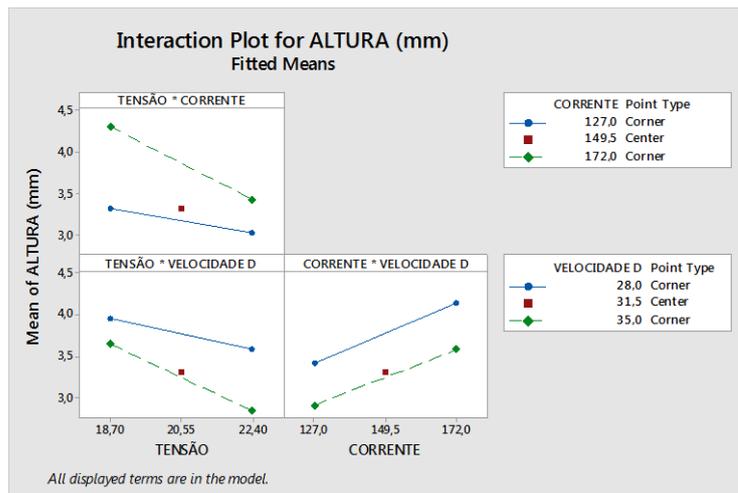


Figura 4.12 – Influência dos efeitos das interações sobre a altura dos cordões.

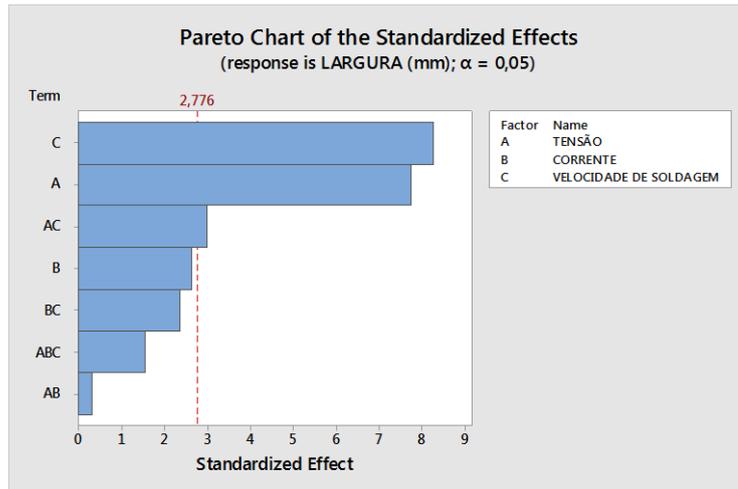


Figura 4.13 – Influência das variáveis sobre largura dos cordões.

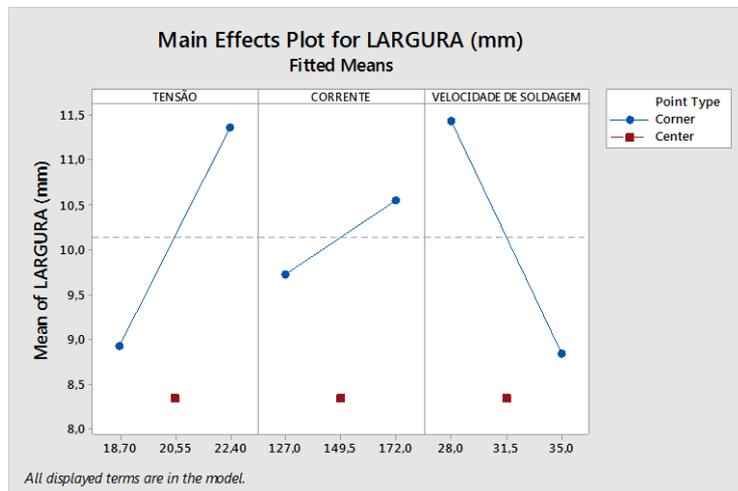


Figura 4.14 – Influência dos efeitos principais sobre a largura dos cordões

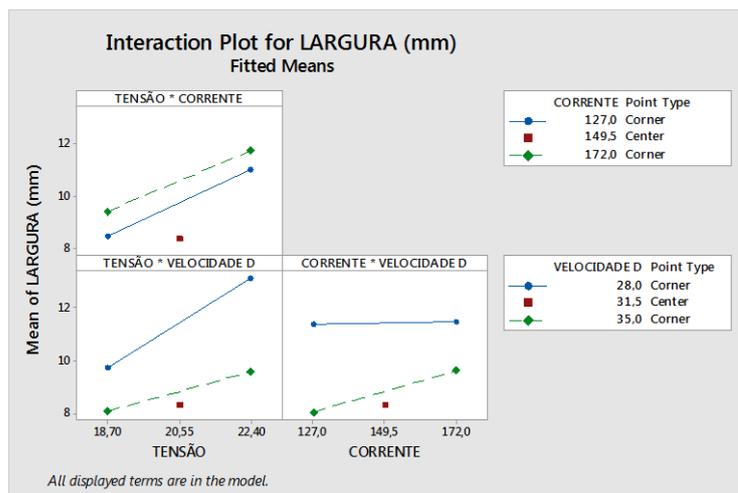


Figura 4.15 – Influência dos efeitos das interações sobre a largura dos cordões.

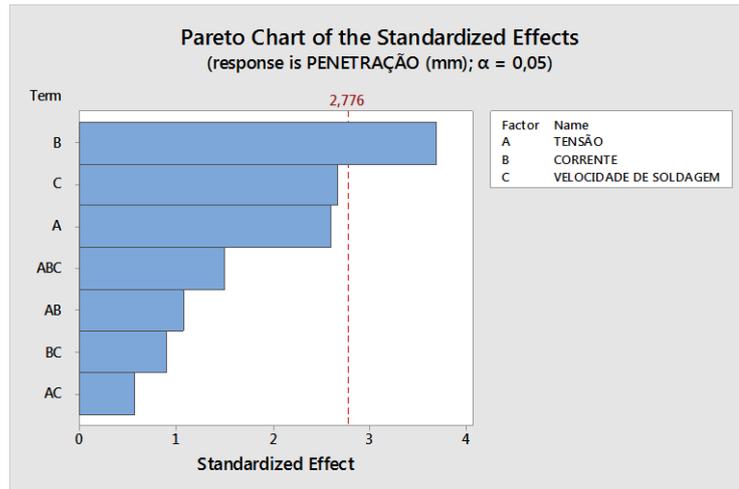


Figura 4.16 – Influência das variáveis sobre penetração dos cordões.

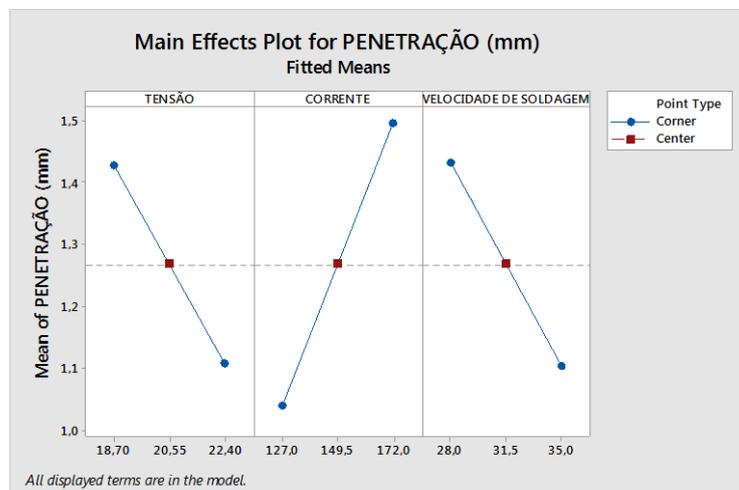


Figura 4.17 – Influência dos efeitos principais sobre a penetração dos cordões.

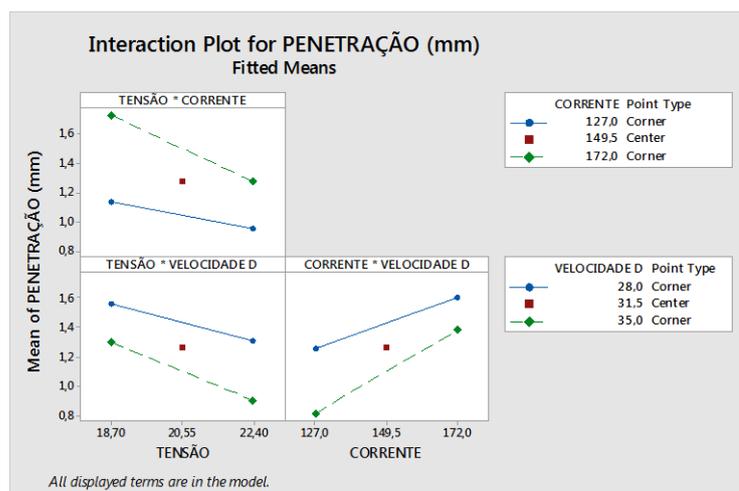


Figura 4.18 – Influência dos efeitos das interações sobre a penetração dos cordões.

A análise dos diagramas mostrou que a velocidade de soldagem exerceu grande influência na altura e largura dos cordões e uma influência menor, porém significativa na penetração dos mesmos. Velocidades maiores diminuiram a altura, a largura e a penetração

dos cordões. Isto porque o aumento da velocidade amortece a força do arco sobre a poça. A largura foi influenciada pela tensão e pela velocidade de soldagem. Cordões mais largos ocorreram em tensões mais altas e velocidades mais baixas.

As interações entre os parâmetros de entrada não exerceram influência significativas sobre a geometria dos cordões.

- **Arame 1 – 0,8mm (mestre) + arame 2 – 1,0mm (escravo)**

Para os testes realizados com Arame 1 – 0,8mm (mestre) + arame 2 – 1,0mm (escravo), pode ser observado nas Figuras 4.19 a 4.27 a influência da tensão, corrente e velocidade de soldagem na geometria dos cordões.

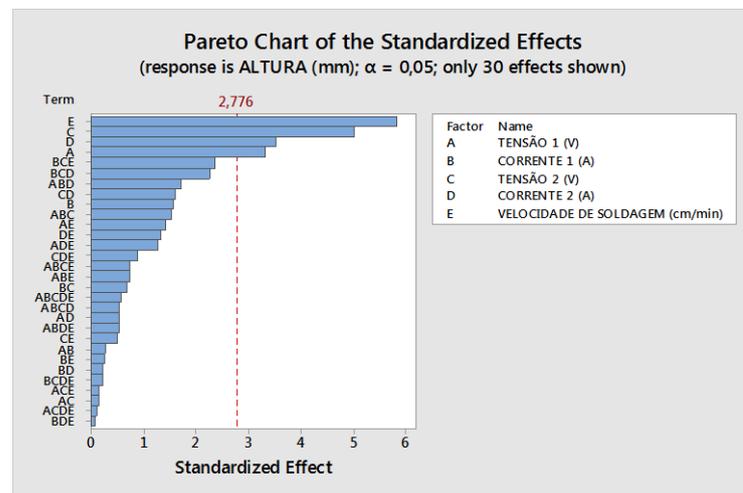


Figura 4.19 – Influência das variáveis sobre altura dos cordões.

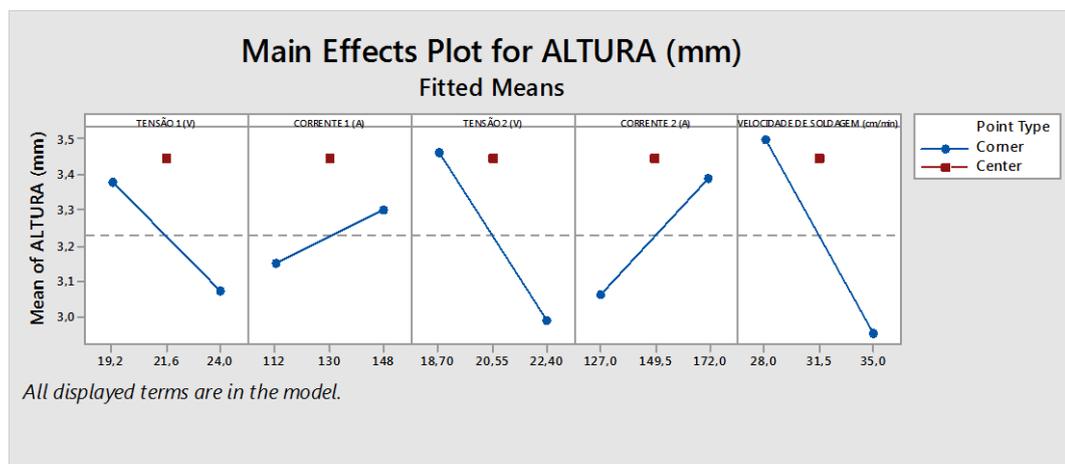


Figura 4.20 – Influência dos efeitos principais sobre a altura dos cordões.

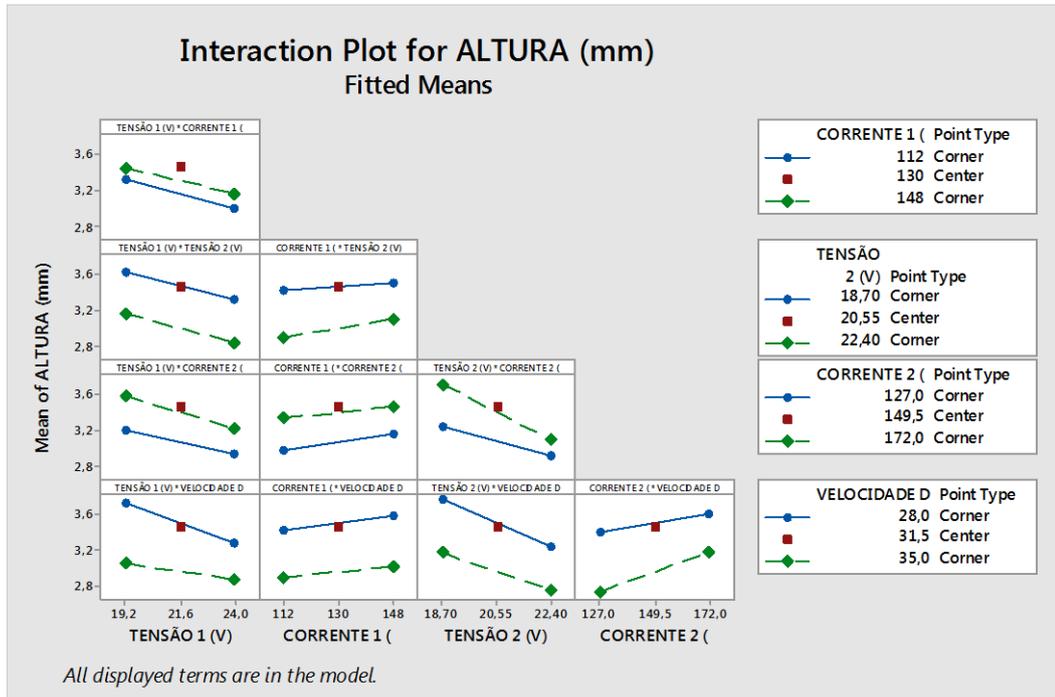


Figura 4.21 – Influência dos efeitos das interações sobre a altura dos cordões.

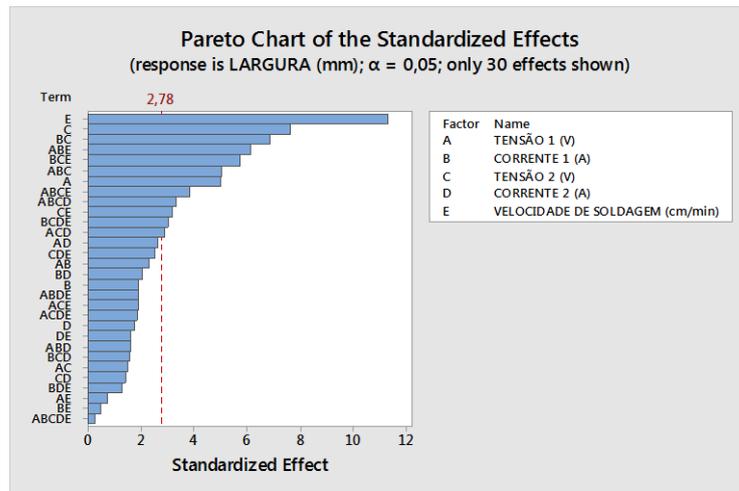


Figura 4.22 – Influência das variáveis sobre a largura dos cordões.

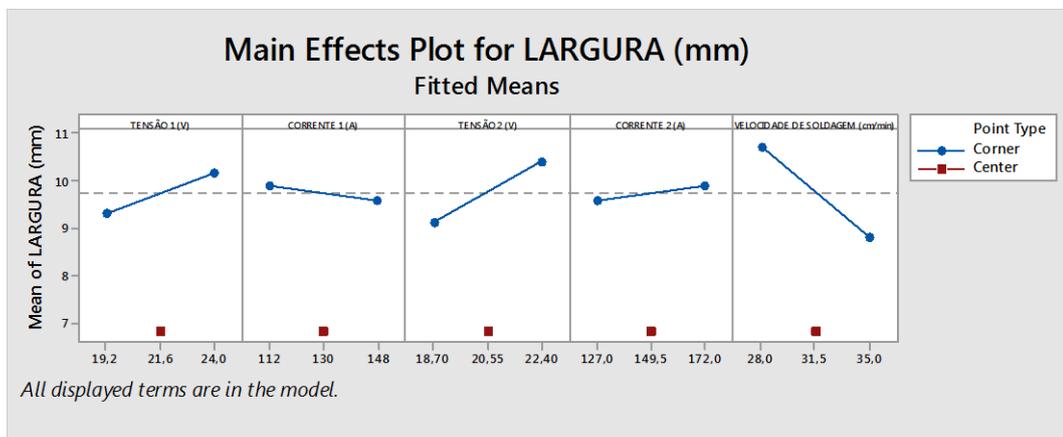


Figura 4.23 – Influência dos efeitos principais sobre a largura dos cordões

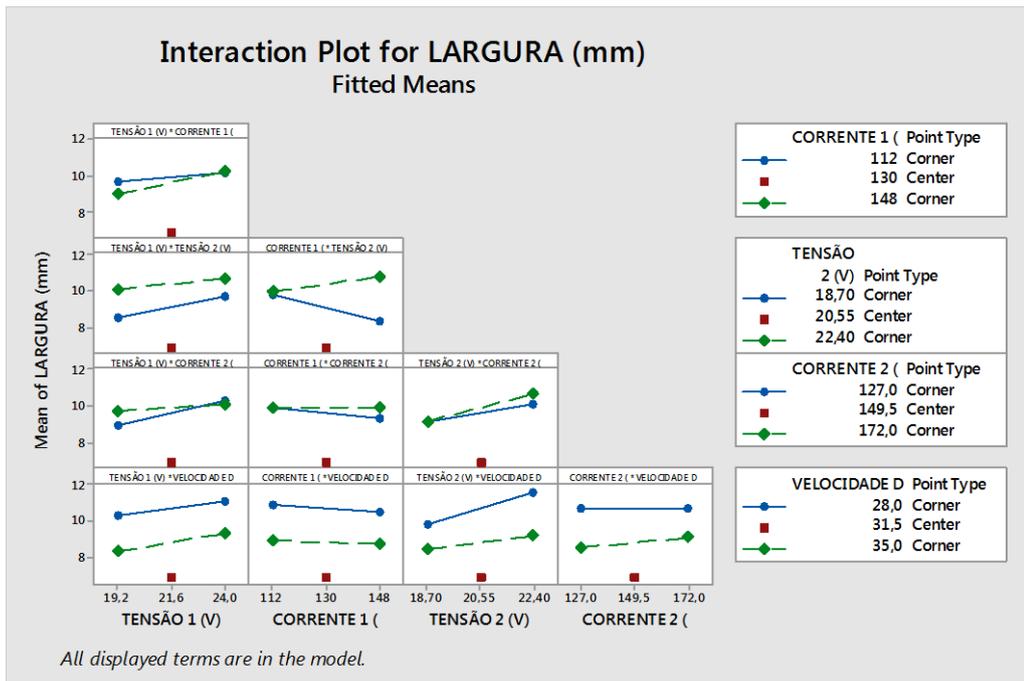


Figura 4.24 – Influência dos efeitos das interações sobre a largura dos cordões.

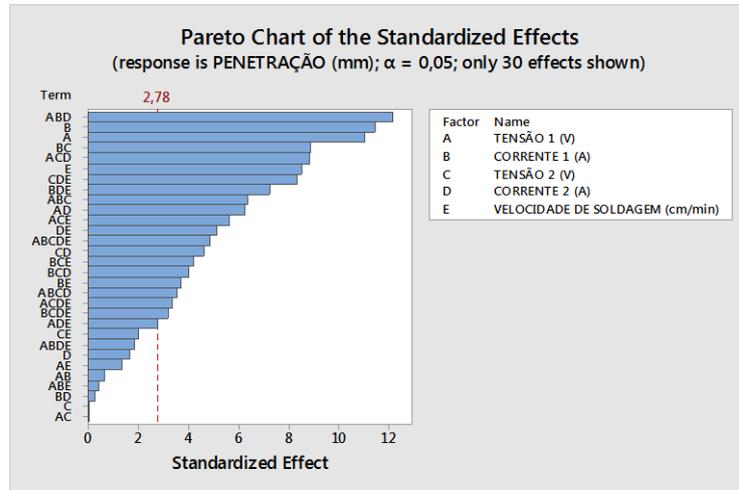


Figura 4.25 – Influência das variáveis sobre a penetração dos cordões.

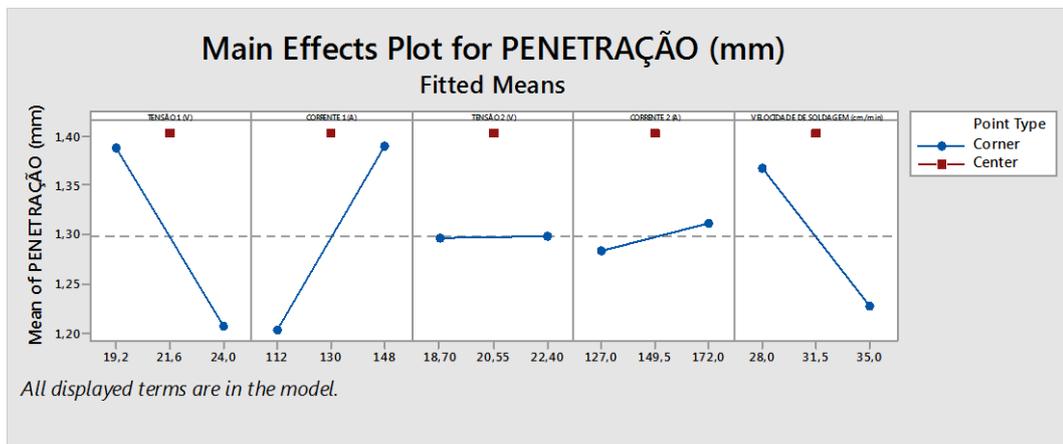


Figura 4.26 – Influência dos efeitos principais sobre a penetração dos cordões.

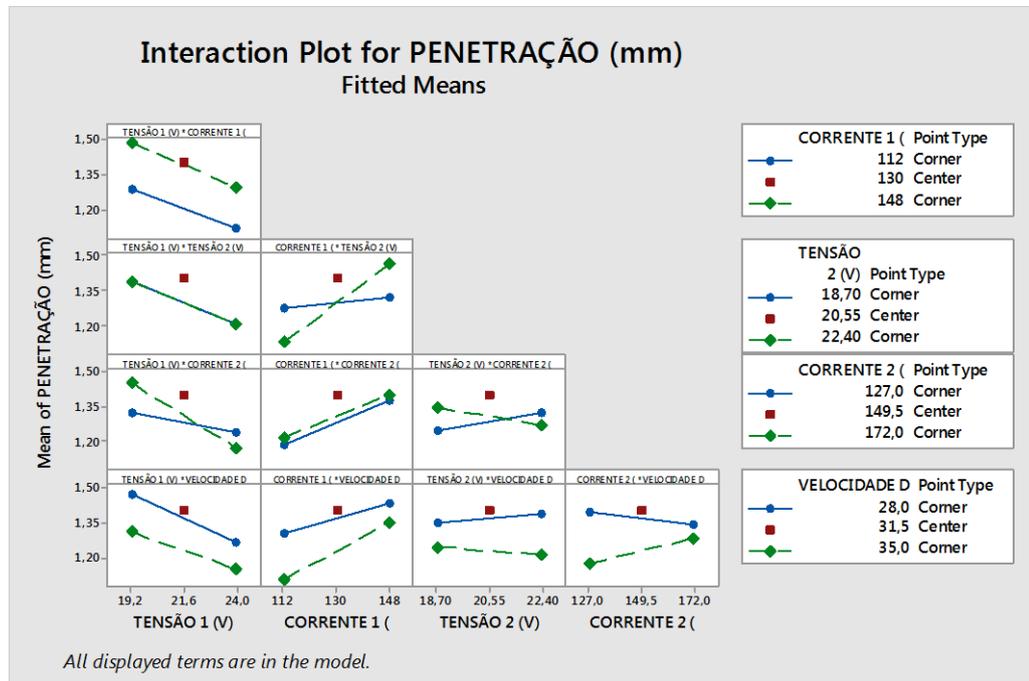


Figura 4.27 – Influência dos efeitos das interações sobre a penetração dos cordões.

Os diagramas de Pareto dos efeitos para esse processo mostram que a altura, largura e penetração foram influenciadas pela velocidade de soldagem, sendo mais evidente nos dois primeiros casos. Os cordões realizados com menores velocidades foram mais altos, largos e profundos que os realizados em velocidades maiores.

A largura do cordão sofreu várias influências, principalmente nas tensões 2 (escrava) e 1 (mestre). Nota-se que há várias interações, sendo que a maioria envolve a corrente de soldagem 1 (mestre), embora a variação da largura tenha sido pequena.

Para a penetração foi possível observar uma maior interação das correntes de soldagem 1 e 2 com a maioria das outras variáveis.

De fato, nos cordões realizados com os arames na posição *Tandem*, as penetrações foram garantidas mais pelo arco mestre e as alturas e larguras, pelo arco escravo.

- **Arame 2 – 1,0mm (mestre) + arame 1 – 0,8mm (escravo)**

Para os testes realizados com Arame 2 – 1,0mm (mestre) + arame 1 – 0,8mm (escravo), verificou-se nas Figuras 4.10 a 4.12 a influência da tensão, corrente e velocidade de soldagem na geometria do cordão.

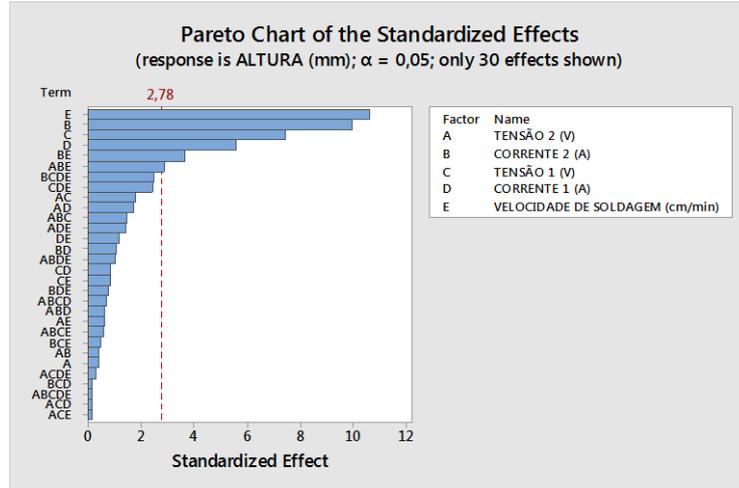


Figura 4.28 – Influência das variáveis sobre a altura dos cordões.

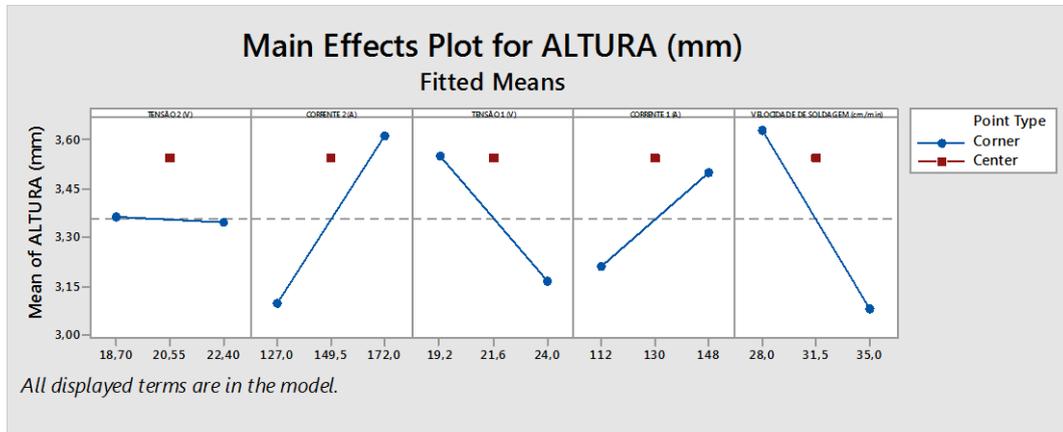


Figura 4.29 – Influência dos efeitos principais sobre a altura dos cordões

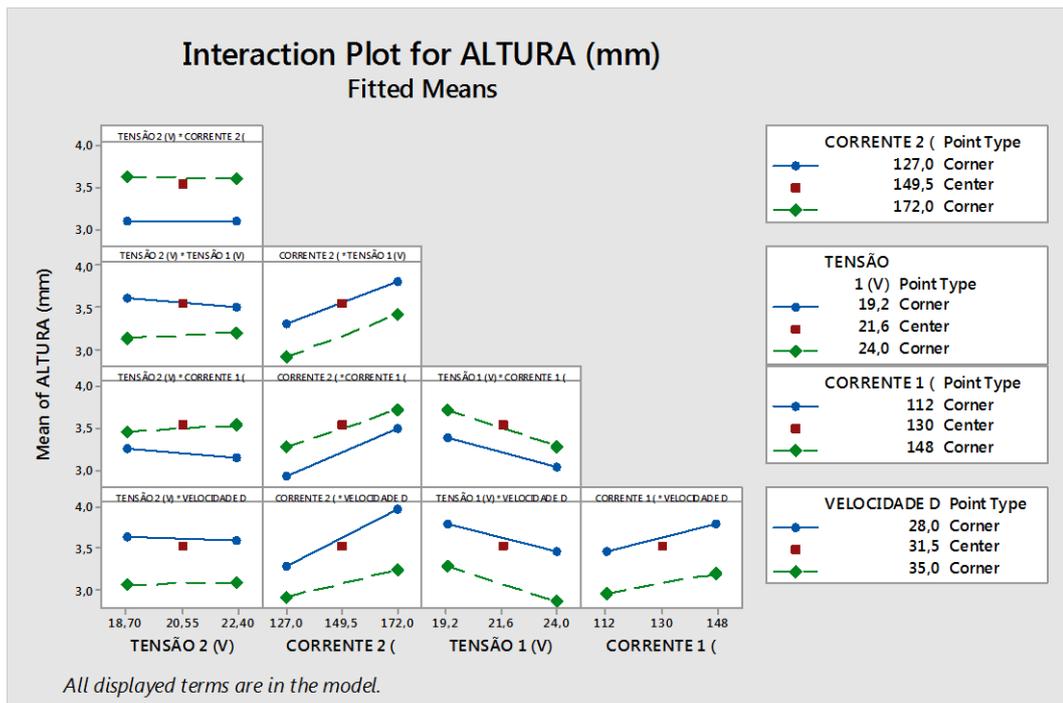


Figura 4.30 – Influência dos efeitos das interações sobre a altura dos cordões.

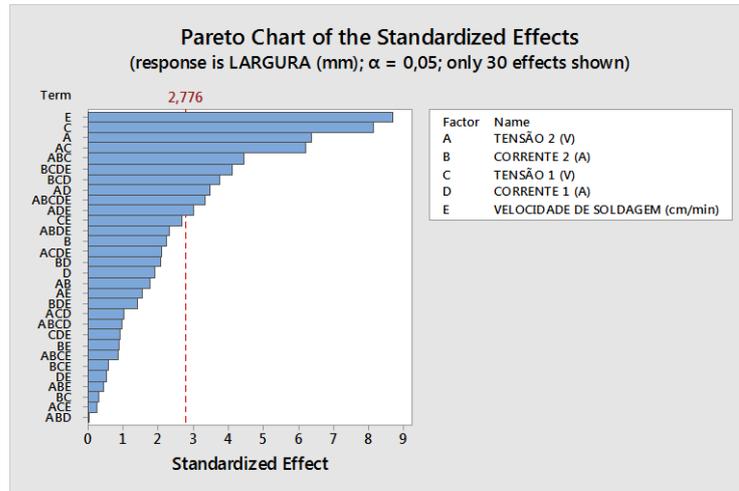


Figura 4.31 – Influência das variáveis sobre a largura dos cordões.

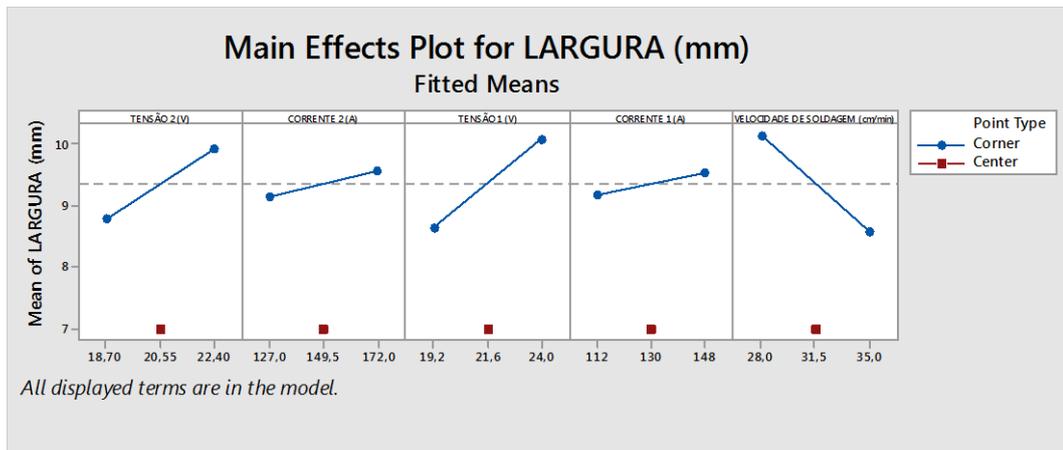


Figura 4.32 – Influência dos efeitos principais sobre a largura dos cordões

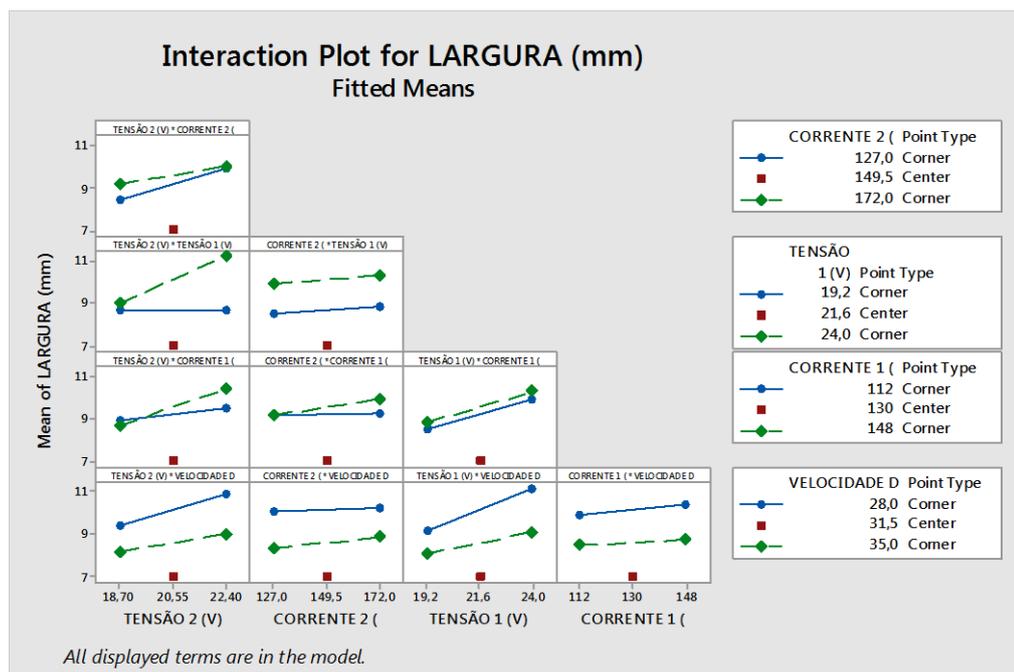


Figura 4.33 – Influência dos efeitos das interações sobre a largura dos cordões.

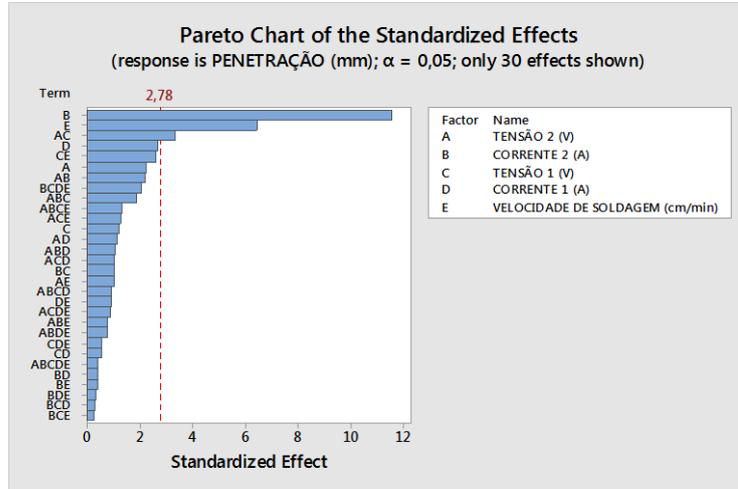


Figura 4.34 – Influência das variáveis sobre a penetração dos cordões.

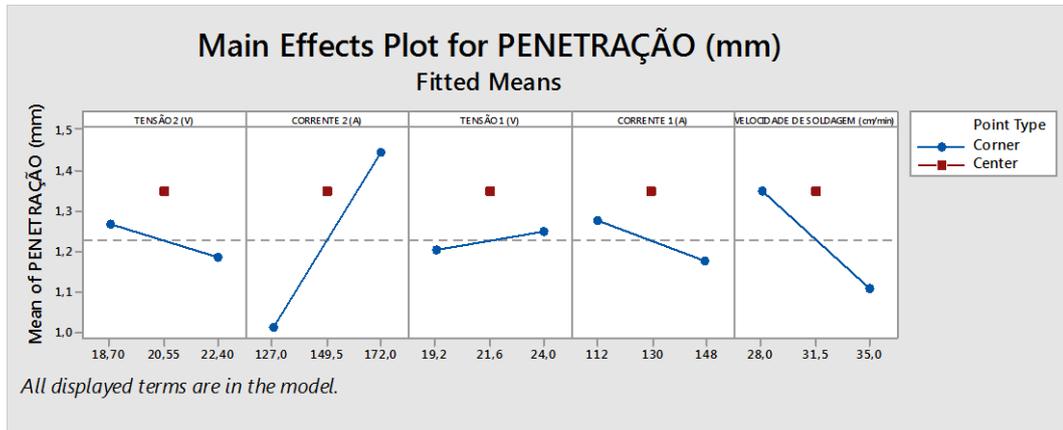


Figura 4.35 – Influência dos efeitos principais sobre a penetração dos cordões

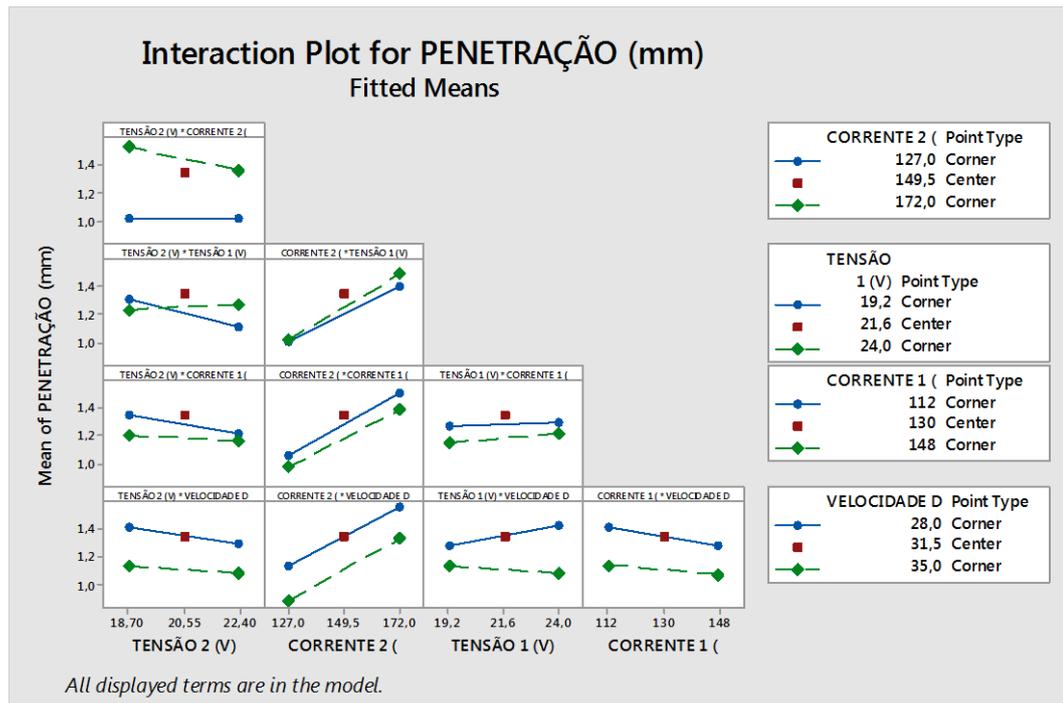


Figura 4.36 – Influência dos efeitos das interações sobre a penetração dos cordões.

A análise dos diagramas mostrou que a velocidade de soldagem exerceu grande influência na altura e largura dos cordões e uma influência menor, porém significativa na penetração dos mesmos. Velocidades maiores diminuíram a altura, a largura e a penetração dos cordões. Isto porque o aumento da velocidade amortece a força do arco sobre a poça.

A corrente do arame 2, ou seja, o que possui 1,0 mm de diâmetro e, que neste caso foi o arame mestre, interferiu significativamente na penetração dos cordões aumentando a profundidade dos mesmos quando se elevou o valor da corrente em questão.

4.1.2. Comparação entre as taxas de diluição

A Figura 4.37 mostrou a comparação entre as taxas de diluição nos cordões nos processos de soldagem realizados conforme os valores dos diâmetros dos arames e suas posições.

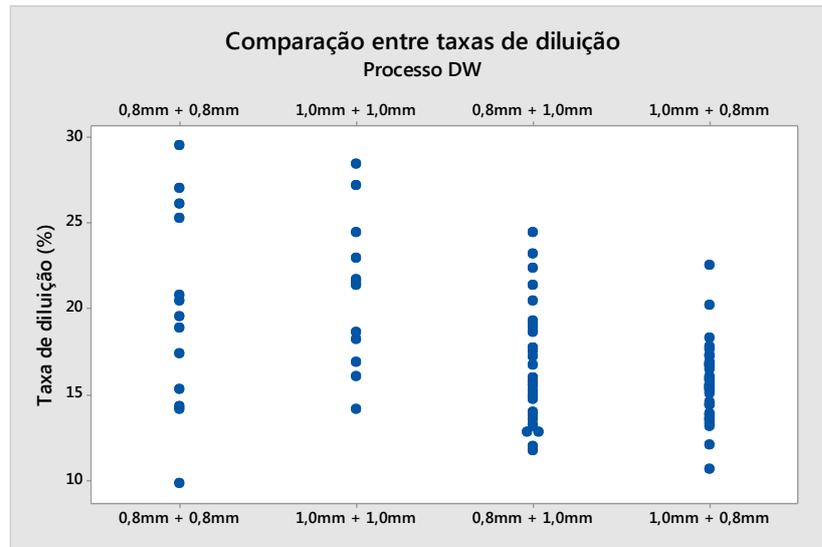


Figura 4.37 – Comparação entre as taxas de diluição nas diferentes combinações entre os arames.

A Figura 4.37 mostrou que as combinações de arames iguais geraram maiores taxas de diluição que as combinações de arames com diâmetros diferentes. No entanto, os valores das taxas de diluição ocasionadas por combinações de arames com diâmetros iguais foram mais dispersos entre si que as formadas através das combinações de arames com diferentes diâmetros.

Também foi possível observar que as combinações cujo arame mestre possuía 0,8 mm de diâmetro originam cordões com maiores valores absolutos de taxa de diluição.

A análise dessa comparação mostrou a importância da ordem (mestre e escravo) dos eletrodos nos processos de soldagem com duplo arame, uma vez que a diluição é um dos principais agentes que afetam as características e propriedades do metal de solda.

As Figuras 4.38 a 4.41 mostram os gráficos de contorno para as combinações dos parâmetros de soldagem onde os valores da taxa de diluição são mais significativos em cada procedimento estudado. Os demais gráficos podem ser encontrados no Apêndice D.

- **Arame 0,8mm (Mestre) + Arame 0,8mm (Escravo)**

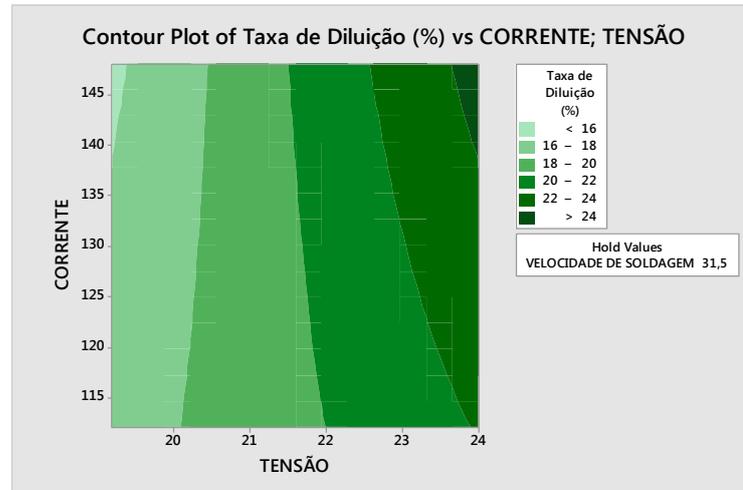


Figura 4.38 – Principais influências das variáveis na taxa de diluição dos cordões.

O gráfico de contorno para este arranjo mostrou que as combinações entre os valores mais altos de corrente e tensão de soldagem geraram os maiores valores de taxa de diluição.

- **Arame 1,0mm (Mestre) + Arame 1,0mm (Escravo)**

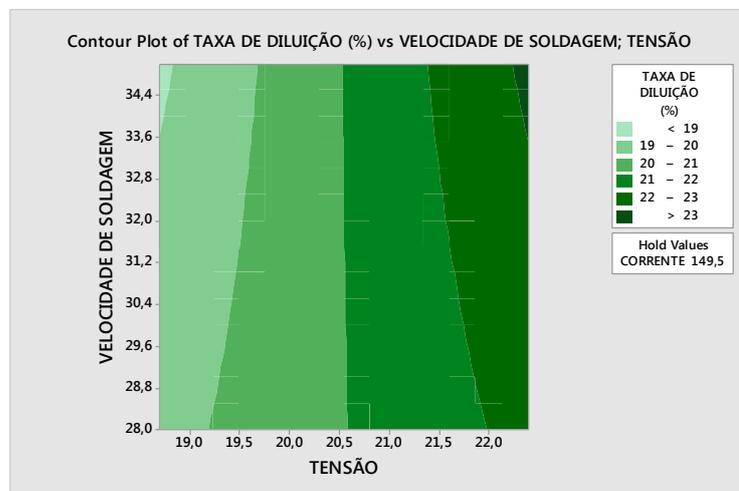


Figura 4.39 – Principais influências das variáveis na taxa de diluição dos cordões.

Para este processo, os maiores valores de taxa de diluição foram obtidos através da combinação entre os maiores valores de tensão e de velocidade de soldagem.

- **Arame 0,8mm (Mestre) + Arame 1,0mm (Escravo)**

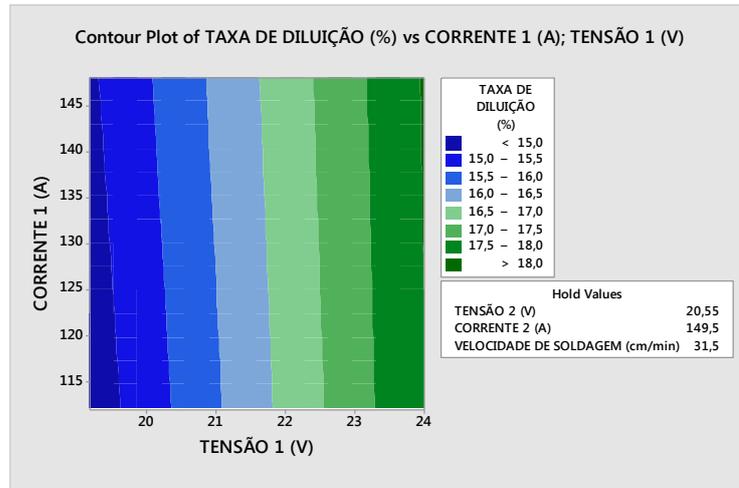


Figura 4.40 – Principais influências das variáveis na taxa de diluição dos cordões.

O gráfico de contorno para o processo com arame 0,8mm (mestre) e arame 1,0mm (escravo) indicou que os maiores valores de taxa de diluição foram atingidos quando se combinou os maiores valores de tensão do eletrodo mestre com quaisquer valores de corrente também do eletrodo mestre.

- **Arame 1,0 mm (Mestre) + Arame 0,8mm (Escravo)**

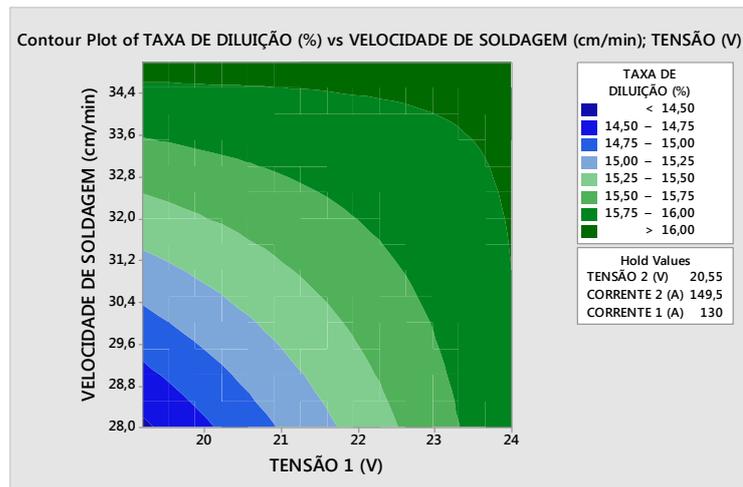


Figura 4.41 – Principais influências das variáveis na taxa de diluição dos cordões.

Para o processo DW com arames 1,0mm (mestre) e 0,8mm (escravo), os maiores valores de taxa de diluição se encontram na região onde se encontram os maiores valores de tensão do arame escravo com os maiores valores de velocidade de soldagem.

A análise dos gráficos de contorno mostrou que, de modo geral, juntamente com os gráficos contidos no Anexo D, o processo DW com eletrodos 1,0 mm (mestre) e 1,0 mm

(escravo) forneceu as maiores taxas de diluição quando comparadas aos outros processos. Vale observar que os valores de corrente de soldagem para o eletrodo de 1,0 mm de diâmetro foram maiores que as correntes utilizadas para o eletrodo com menor espessura. Logo, a combinação entre os fatores de entrada do processo é que realmente produz cordões com maiores taxas de diluição. O processo que utilizou arame 0,8mm (mestre) e 1,0mm (escravo) gerou cordões com menores taxas de diluição. Isto ocorreu porque o eletrodo mestre, que é responsável pela penetração, utilizou valores de corrente mais baixo que o eletrodo escravo.

4.2. Análise Metalográfica

A análise metalográfica foi realizada nos cordões ótimos de cada processo. As imagens dos produtos gerados pelos processos realizados são apresentadas pelas Figuras de 4.42 a 4.46.

Metal de base

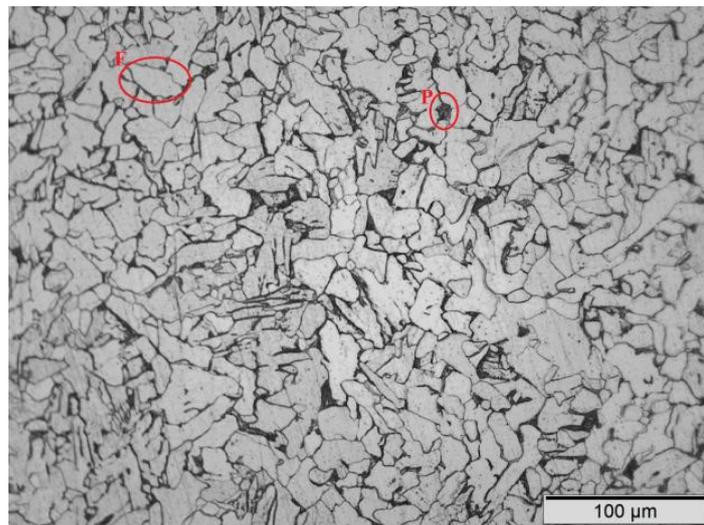


Figura 4.42 – Análise metalográfica do metal de base.

O metal de base apresenta grãos de ferrita (F) e perlita (P) e algumas inclusões.

a) Arame 1 – 0,8mm (Mestre) + Arame 1 – 0,8mm (Escravo)

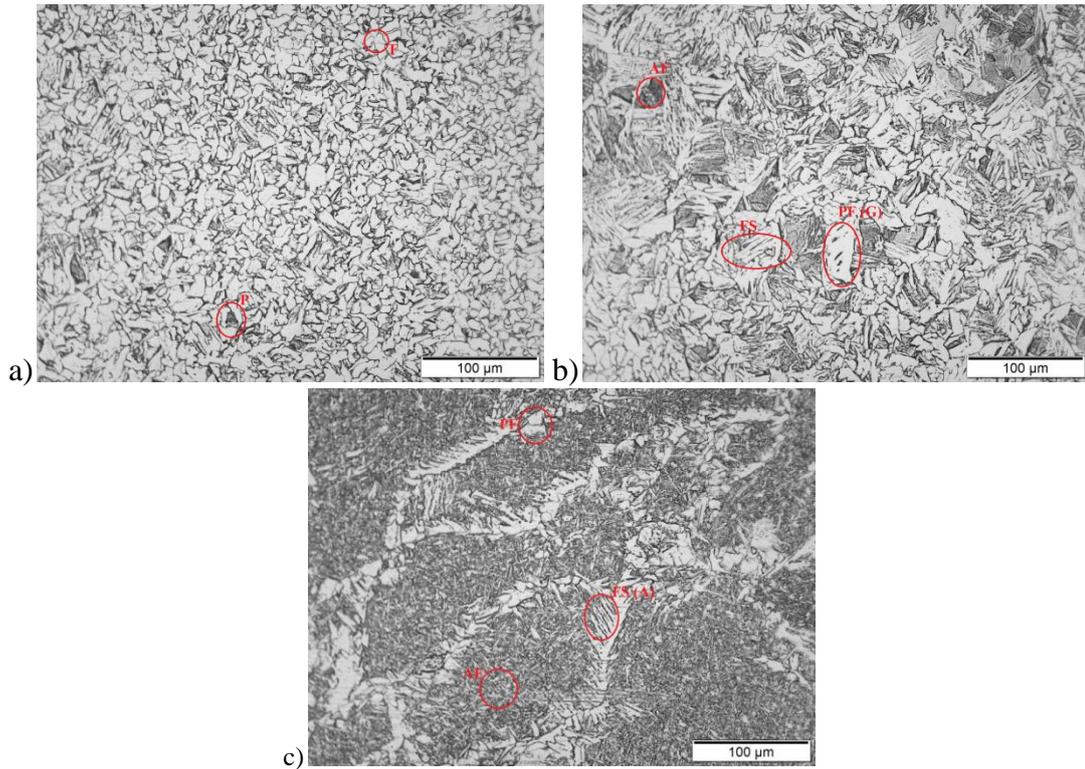
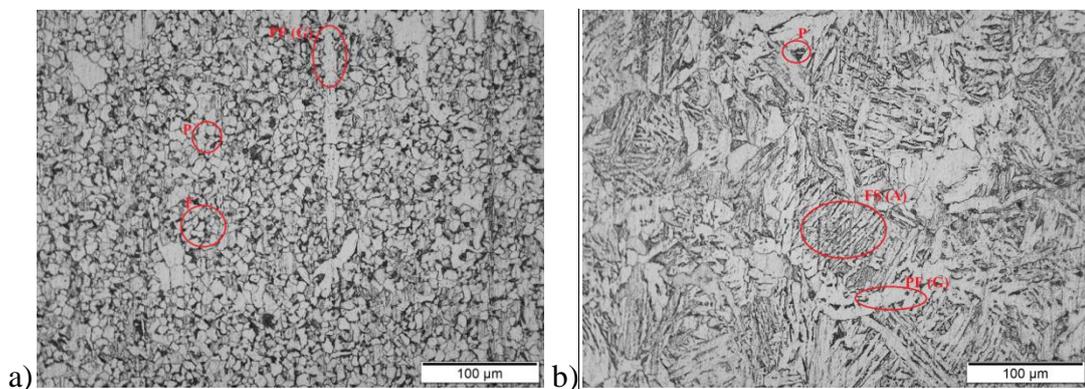


Figura 4.43 – Metalografia de um corpo de prova soldado. (a) Região de refino de grão da ZTA; (b) Região de granulação grosseira da ZTA; (c) Metal de adição.

Neste caso, a região de refino de grão da ZTA é composta por ferrita (F) e perlita (P) e possui grãos pequenos. A região de granulação grosseira é constituída por ferrita acicular (AF), ferrita com segunda fase (FS) e ferrita de contorno de grão (PF (G)). O metal de adição possui a estrutura formada por ferrita primaria (PF), ferrita com segunda fase alinhada (FS (A)) e ferrita acicular (AF).

b) Arame 2 – 1,0mm (Mestre) + Arame 2 – 1,0mm (Escravo)



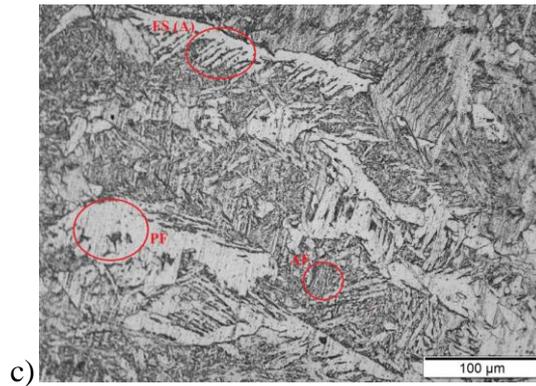


Figura 4.44 – Metalografia de um corpo de prova soldado. (a) Região de refino de grão da ZTA; (b) Região de granulação grosseira da ZTA; (c) Metal de adição.

Neste processo, a região de refino de grão da ZTA apresenta perlita (P), ferrita (F) e ferrita de contorno de grão (PF (G)). A região de granulação grosseira é constituída por perlita (P), ferrita com segunda fase alinhada (FS (A)) e ferrita de contorno de grão (PF (G)). O metal de base é composto por ferrita com segunda fase alinhada (FS (A)), ferrita primária e ferrita acicular (AF).

c) Arame 1 – 0,8mm (Mestre) + Arame 2 – 1,0mm (Escravo)

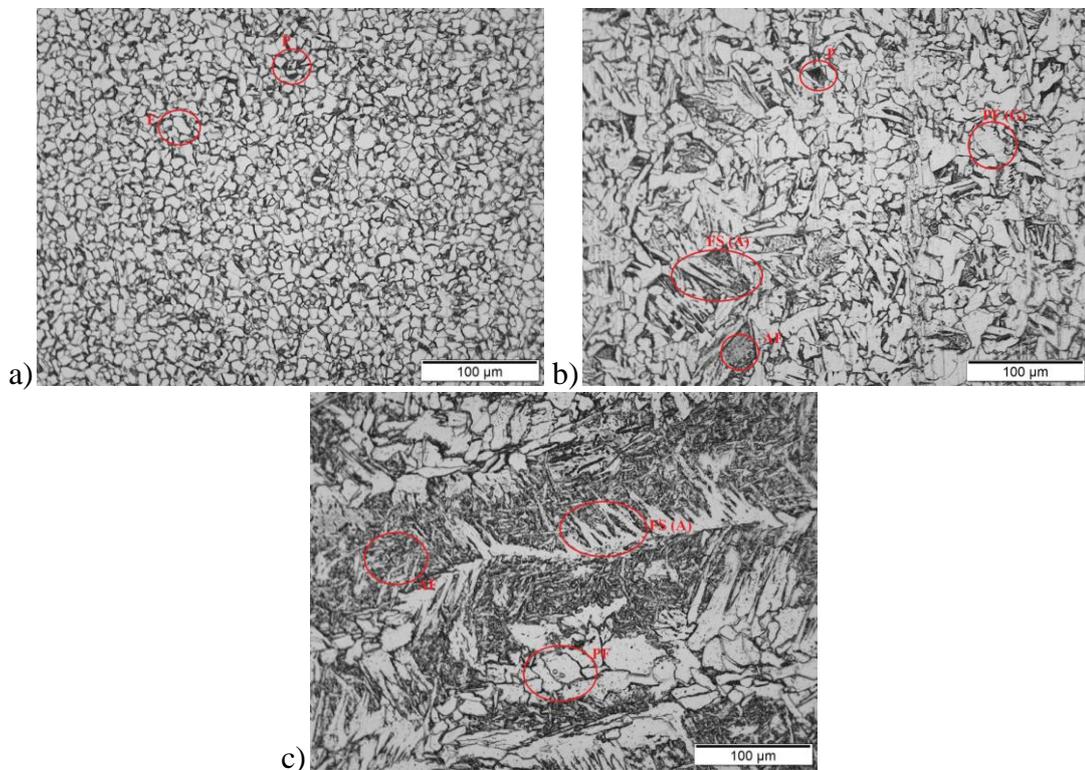


Figura 4.45 – Metalografia de um corpo de prova soldado. (a) Região de refino de grão da ZTA; (b) Região de granulação grosseira da ZTA; (c) Metal de adição.

A análise da Figura 4.21 mostra que a região de refino de grão da ZTA é composta por pequenos grãos de ferrita (F) e perlita (P). A região de granulação grosseira apresenta grãos de perlita (P), ferrita de contorno de grão (PF (G)), ferrita com segunda fase alinhada (FS (A)) e ferrita acicular (AF). O metal de base é formado por ferrita acicular (AF), ferrita com segunda fase alinhada (FS (A)) e ferrita primária (PF).

d) Arame 2 – 1,0mm (Mestre) + Arame 1 – 0,8mm (Escravo)

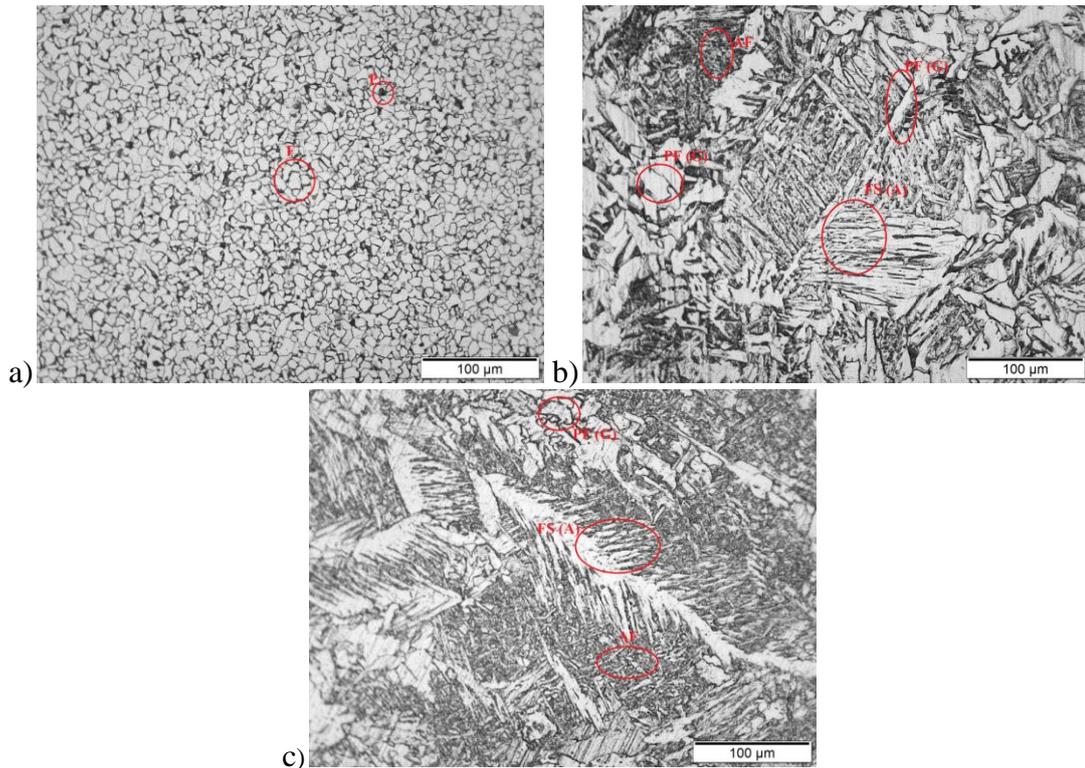


Figura 4.46 – Metalografia de um corpo de prova soldado. (a) Região de refino de grão da ZTA; (b) Região de granulação grosseira da ZTA; (c) Metal de adição.

Neste processo, a região de refino de grão da ZTA é composta por ferrita (F) e perlita (P). A região de granulação grosseira apresenta ferrita acicular (AF), ferrita de contorno de grão (PF (G)) e ferrita com segunda fase alinhada (FS (A)). O metal de adição é formado por ferrita de contorno de grão (PF (G)), ferrita com segunda fase alinhada (FS (A)) e ferrita acicular (AF).

Ao se comparar as metalografias realizadas, observou-se que os grãos gerados no metal de adição utilizando arames mestre e escravo com 0,8mm de diâmetro são mais refinados que aqueles formados quando se usa arames mestre e escravo com 1,0mm de diâmetro ou quando se realizou a combinação entre arames 0,8mm e 1,0mm de espessura.

As regiões parcialmente fundidas apresentaram granulações diferentes entre si. Além disso, os grãos formados nas ZTA's possuem tamanhos diferentes.

As diferenças encontradas na comparação entre as combinações dos eletrodos mostram a importância de se saber escolher qual arame deverá ser o mestre e qual deverá ser o escravo dependendo do resultado almejado.

4.3. Ensaio de Microdureza

A Figura 4.23 mostra a comparação entre os perfis de microdureza.

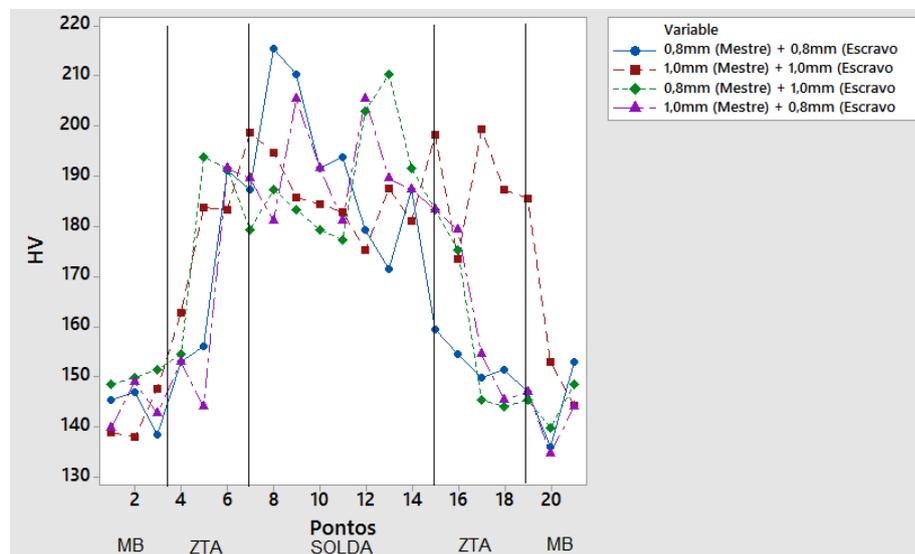


Figura 4.47 – Perfis de Microdureza Vickers nos processos GMAW-DW.

Pela análise da Figura 4.23 pode-se observar que a microdureza foi menor no metal base, aumentou na ZTA e tem seu valor máximo na zona fundida, pois a adição de materiais aumenta a dureza na zona fundida em todas as configurações realizadas.

A análise da Figura 4.47 mostrou que os processos DW que tem o arame com 0,8mm de diâmetro como mestre geram maiores valores absolutos de microdureza Vickers. Isto está relacionado com resfriamento mais rápido da poça de fusão.

No caso da ZTA, os maiores valores foram encontrados na configuração de 1,0 mm (mestre) e 1,0 mm (escrava). Isto pode ser explicado devido ao maior aporte localizado, gerando valores maiores para a zona termicamente afetada.

5. CONCLUSÕES

O uso do projeto de análise de experimentos se mostrou eficiente, rápido e prático.

A utilização de duas fontes solda foi eficaz para obtenção dos cordões de solda, tanto para o arame 0,8mm quanto para 1,0mm.

Foi possível economizar gás, pois se utilizou apenas uma saída de gás na tocha mestre.

É possível aumentar a faixa de corrente, obtendo maiores aportes térmicos, utilizando o método Tandem.

É possível ter maiores taxas de fusão, quando comparadas com processos convencionais de GMAW.

O processo de soldagem GMAW-DW proporcionou rendimentos superiores aos da técnica GMAW convencional, conforme verificado na literatura. É uma boa alternativa para as indústrias aumentarem sua produtividade.

Observou-se que as maiores interações entre a tensão, corrente e velocidade de soldagem ocorreram nas combinações dos arames 0,8 mm e 1,0 mm.

Ressalta-se a influência das variáveis na altura, largura e penetração nas combinações realizadas. A penetração teve uma influência maior da corrente, enquanto a largura uma influência maior da tensão. Nestes processos tem que sempre estudar todas as variáveis, em conjunto, pois não é possível analisar separadamente.

No caso da diluição, nota-se que as maiores taxas de diluição ocorreram quando os arames tinham os mesmos diâmetros. Porém, os resultados foram mais dispersos, em comparação com eletrodos de diâmetros diferentes.

Em geral, todas as micrografias apresentaram semelhança quanto aos microconstituintes presentes, na região do cordão dos perfis das amostras. Como o aspecto microestrutural de um metal de solda é fortemente dependente da composição química e do ciclo térmico que o metal é submetido, a constatação da aparente semelhança dos microconstituintes presentes nas várias micrografias, pode ser atribuída ao fato das juntas soldadas terem sido preenchidas com o mesmo tipo de composição química do arame, mesmo sendo de diâmetro diferente.

No caso da microdureza, verificou-se que com o arame com 0,8mm de diâmetro como mestre gerou uma microdureza maior no metal de adição.

No aspecto geral, cordões gerados apenas com arames com 0,8mm de diâmetro tiveram geometria mais favorável, maiores taxas de diluição e microdureza absolutas e grãos mais refinados em comparação aos demais cordões.

6. SUGESTÃO PARA TRABALHOS FUTUROS

- Desenvolver o mesmo trabalho, porém com uma única fonte de solda.
- Utilizar a mesma técnica, porém com outros materiais e eletrodos.
- Soldar com o processo FCAW, porém com duplo arame.

REFERÊNCIAS

- ADAK, D. K.; MUKHERJEE, M.; PAL, T. K. Development of a direct correlation of bead geometry, grain size HAZ width the GMAW process parameters on bead-on-plate welds of mild steel. **Transactions of the Indian Institute of Metals**. v.68, n.5, p.839-849. Mar.2015.
- AKULOV, A. I., SPITSYN, V. V., CHERNYSHOV, G. G., Characteristics of Automatic Twin Arc CO₂ Welding. **Svar. Proiz**, v.1.14, pp.31-33. June 1966.
- AWS – **Welding Handbook Processes**, v.1, 8 ed, USA, 1987.
- AWS D1.1/D1.1M: 2004 – **Structural Welding Code – Steel**. American Welding Society, (2004).
- BACELAR, A. R. C.; FERRAZ, A. C. **Estudo da Viabilidade Operacional do Processo de Soldagem MAG com Alimentação Adicional de um Arame Frio**. 2005. Trabalho de Conclusão de Curso (Graduação em Engenharia Mecânica) - Universidade Federal do Pará, Belém, PA.
- BARBOSA, R. P. **Tecnologia Mecânica: Metalurgia da soldagem e soldabilidade dos materiais**. 2007. 109p. Apostila (Tecnologia Mecânica) - Centro Universitário do Leste de Minas Gerais. Coronel Fabriciano, MG.
- BARRA, S. R. **Influência do processo MIG/MAG térmico sobre a microestrutura e a geometria da zona fundida**. 2003. 248 p. Tese (Doutorado em Engenharia Mecânica) – Departamento de Engenharia Mecânica, Universidade Federal de Santa Catarina. Florianópolis, SC.
- BARROZO, T. S., **Estudo da soldagem FCAW com arame frio**. 2006. 66p Trabalho de conclusão de Curso (Graduação em Engenharia Mecânica). Universidade Federal do Pará. Belém, PA.
- BENYOUNIS, K. Y.; OLABI, A. G. Optimization of different welding process using statistical and numerical approaches – A reference guide. **Advances in Engineering Software**. n.39, p.483-496, mai.2007.
- BHADESHIA, H. K. D. H., HONEYCOMBE, R. W. K. **Steel: Microstructure and properties**. 3 ed. USA: Elsevier, 2006.
- BENTO, A. Como fazer uma revisão da literatura: Considerações teóricas e práticas. **Revista JA (Associação Acadêmica da Universidade da Madeira)**, nº 65, ano VII (pp. 42-44). Mai. 2012. ISSN: 1647-8975.
- BUTTON, S. T., **Metodologia para planejamento experimental e análise de resultados**. 2005. 88p. Apostila de disciplina (Pós-graduação em Engenharia Mecânica) – Universidade Estadual de Campinas. Campinas, SP.
- CALLISTER, JR.W.D. **Ciência e Engenharia dos Materiais: Uma Introdução**. 7 ed. Rio de Janeiro: LTC, 2008

COLEMAN, D. E.; MONTGOMERY, D. C. A Systematic Approach to Planning for a Designed Industrial Experiment. **Technometrics**. v.35, n.1, p.1-12, fev.1993.

COLOMBARI, R. R. **Aplicação de delineamento de experimentos para o processo de solda à projeção**. 2004. 119p. Dissertação (Mestrado) – Universidade Federal de Itajubá, Itajubá, MG.

DIAS, A. O., et. al., Aplicação da técnica de projeto e análise de experimento na soldagem do aço inoxidável AISI-304 com arame tubular. In: SIMPÓSIO DE MECÂNICA COMPUTACIONAL, 9., 2010, São João Del Rei. Disponível em: < http://www.ufsj.edu.br/simmec2010/pagina/analise_numerica/APF-02.pdf >. Acesso em 04 fev 2014.

DILTHEY, U.; REISGEN, U.; BACHEN, H. Increased Productivity as a Result of Higher Welding Speed by Using Two-Wire-GMAW Process. Third European **Conferencean Joing Technology-Eurojoin** 3, abril, 1998.

ESAB, **OK autrod 12.51**. 2015. Disponível em < <http://www.esab.com.br/br/pt/products/index.cfm?fuseaction=home.product&productCode=0031100&tab=2> > Acesso em 05 ago 2014.

FELIZARDO, I; BRACARENSE, A. Q. Soldagem MIG/MAG e com arame tubular – Coletânea de informações retiradas de diversas bibliografias. 53p. 2011. Disponível em: < <http://docslide.com.br/documents/apostila-soldagem-mig-mag.html>> Acesso em 27 ago 2012.

FERRAZ, J. C., et. al., l.m.; **Estudo da Competitividade de Cadeias Produtivas Integradas no Brasil: Impacto das Zonas de Livre Comércio - Cadeia: Indústria Naval**. 2002. p 1-48. UNICAMP. Campinas, SP.

FILHO, C. A., **Metalurgia da Soldagem**. 2008. 42p. Apostila do Curso de Técnico em Mecânica. CEFET – PA. Disponível em < <http://www.ebah.com.br/search?q=SOLDAGEM%20soldagem+CEFET> >. Acesso em 22 jun 2015.

FORTES, C. **Arames Sólidos**. 2005. p. 2-40. Apostila ESAB S/A, Contagem – MG. Disponível em < http://www.esab.com.br/br/pt/education/apostilas/upload/1901104rev0_apostilasoldagemmig_mag_low.pdf >. Acesso em 22 jun 2015.

GONZÁLEZ, A. **Análise e desenvolvimento do processo MIG/MAG duplo arame com potencial único**. 1999. 143p. Dissertação (Mestrado em Engenharia Mecânica) – Universidade Federal de Santa Catarina. Florianópolis, SC.

GONZÁLEZ, A. M. R.; DUTRA, J. C. Análise e desenvolvimento do processo MIG/MAG duplo arame com potencial único. In: XXV ENCONTRO NACIONAL DE TECNOLOGIA DA SOLDAGEM. Belo Horizonte, MG, 1999. Disponível em : < <http://www.labsolda.ufsc.br/site/index.php/mn-publicacoes/artigos/congressos/58-blank-63537597>> Acesso em: 04 fev. 2016.

GROETELAARS, P. J. **Influência na variação de parâmetros de soldagem sobre a transferência metálica e perfil no cordão no processo MIG/MAG duplo arame.** 2005. 74p. Dissertação (Mestrado em Engenharia Mecânica) – Universidade Federal de Uberlândia. Uberlândia, MG.

GUPTA, V. K.; PARMAR, R. S. Fractional factorial technique to predict dimensions of the weld bead in automatic submerged arc welding. **Journal of the Institution of Engineers.** n.70, p.65-75, Nov.1989.

HARRIS, P.; SMITH, B. L. Factorial techniques for weld quality prediction. **Metal Construction.** v.10, n.11, p.661-666. Nov.1983.

IRVIN, B. Shielding gases are the key to innovations in welding. **Welding Journal.** Miami. p.37-41, jan. 1999.

JURAN, J. M.; GODFREY, A. B. The quality control process. In: JURAN, Joseph M. (Co-ed.). **Juran's Quality Handbook.** 5 ed. Nova Iorque: McGraw-Hill, 1998. p.4-8.

KANNAN, T.; YOGANANDL, J. Effect of process parameters on clad bead geometry and shape relationships of stainless steel claddings deposited by GMAW. **Journal Advanced Manufacturing Technology.** v.47, p.1083-1095, 2010.

KARADENIZ, E.; OZSARAC, U.; YILDIZ, C. The effect of process parameters on penetration in gas metal arc welding processes. **Materials & Design.** v. 28, p. 649 – 656, set. 2007. Disponível em < <http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0261306905001913> >. Acesso em 03 set 2012.

LINCOLN ELECTRIC. **GMAW Welding** Guide: Product and procedure selection. 2010. Disponível em: < [http://www.lincolnelectric.com/assets/global/Products/Consumable MIGGMAWwires-SuperArc-SuperArcL-56/c4200.pdf](http://www.lincolnelectric.com/assets/global/Products/Consumable_MIGGMAWwires-SuperArc-SuperArcL-56/c4200.pdf) >. Acesso em 27 jun 2015.

MARQUES, P. V., MODENESI, P. J., BRACARENSE, A. Q. **Soldagem: Fundamentos e Tecnologia.** 3. ed. Belo Horizonte: UFMG, 2009.

MICHIE, K., BLACKMAN, S., OGUNBIYI, T. E. B., Twin-wire GMAW: Process Characteristics and Applications. **Welding Journal,** New York, v.78, n.5, p.31-34, may. 1999.

MIGUEL, V.; ORTIZ, F. M.; MANJABACAS, M. C.; CONESA, E. J. M.; MARTÍNEZ, A. M.; COELLO, J. Optimización multiobjetivo del proceso de soldeo GMAW de la aleación AA 6063-T5 basado en la penetración y en la zona afectada térmicamente. **Revista de Metalurgia.** v.51, n.1, 7pp., 2015.

MODENESI, P. J, MARQUES, P. V., SANTOS, D. B. **Introdução à Metalurgia da Soldagem.** 2012. 209p. Apostila (Metalurgia da Soldagem) – Departamento de Engenharia Metalúrgica e de Materiais, Universidade Federal de Minas Gerais, Belo Horizonte, MG 2012. Disponível em: < <http://demet.eng.ufmg.br/wp-content/uploads/2012/10/metalurgia.pdf> >. Acesso em: 22 jun 2015.

MOGROVEJO, M. G., **Estudo do processo MIG/MAG com dois arames e único arco**. 2011. 32p. Projeto (Dissertação de Mestrado) – Centro Tecnológico, Universidade Federal de Santa Catarina. Florianópolis, SC.

MONT'ALVÃO, C. A. **Determinação dos Fatores Significativos do Processo de Corte por Plasma a Ar Comprimido através da Utilização do Projeto e Análise de Experimentos**. 1997. Dissertação (Mestrado) – Escola Federal de Engenharia de Itajubá, Itajubá, MG.

MONTGOMERY, D. C. **Design and Analysis of Experiments**. 5 ed. New York: John Wiley & Sons Inc., 1997.

MONTGOMERY, D. C.; RUNGER, G. C. **Estatística Aplicada e Probabilidade Para Engenheiros**. 5 ed. Rio de Janeiro: LTC, 2012.

MOREHEAD, T. Automatic Multiwire GMAW Multiplies Productivity. **Welding Journal**, New York, 2003.

MOREIRA, A.F; et. al. Efeito da Adição de CO₂ na Atmosfera Protetora em Processos de Soldagem com Arame Tubular AWS E309LT-1. In: CONGRESSO BRASILEIRO DE ENGENHARIA DE FABRICAÇÃO, 4, Estância de São Pedro. **Anais Eletrônicos...** Estância de São Pedro. 2007. Disponível em < <http://www.abcm.org.br/anais/cobef/2007/files/node079.html> >. Acesso em 23 ago 2012.

MOTTA, M. F.; DUTRA, J. C. MIG/MAG duplo arame com potenciais isolados: Características e Desempenho do Processo. In: Congresso Nacional de Soldagem, 26, 2000, Curitiba. **Anais Eletrônicos...** Curitiba, 2000. Disponível em: < <http://www.labsolda.ufsc.br/site/index.php/mn-publicacoes/artigos/congressos/288-mig-mag-duplo-arama-com-potenciais-isolados-caracteristicas-e-desempenho-do-processo> >. Acesso em: 24 jun 2015.

MOTTA, M. F., **Aplicação do Processo MIG/MAG Pulsado com Duplo Arame e Potenciais Isolados em Soldagem de Revestimento**. 2002. 153p Tese (Doutorado em Engenharia Mecânica) - Universidade Federal de Santa Catarina. Florianópolis, SC. Disponível em: < <http://repositorio.ufsc.br/xmlui/handle/123456789/84397> >. Acesso em: 04 fev 2014.

MOTTA, M.F.; DUTRA, J.C. Efeitos das variáveis do processo MIG/MAG duplo arame com potenciais isolados nas características geométricas do cordão de solda. **Soldagem e Inspeção**, São Paulo, vol.10, n.1, jan/mar 2005. Disponível em < <http://www.labsolda.ufsc.br/site/index.php/mn-publicacoes/artigos/periodicos/250-efeitos-das-variaveis-do-processo-mig-mag-duplo-arama-com-potenciais-isolados-nas-caracteristicas-geometricas-do-cordao-de-solda> >. Acesso em: 23 ago 2012.

MULLIGAN, S. J.; PARMAR, R. S.; SUD, S. K. Effect of submerged arc process variables on dilution and bead geometry in single wire surfacing. **Journal of Materials Processing Technology**. n.37, p.767-780, Feb.1993.

MULLIGAN, S. J.; MELTON, G. B. An Assessment of the Tandem MIG/MAG Welding Process. United Kingdom: TWI – The welding Institute, 21p., Maio 2002.

MURRAY, P. E. Selecting parameters for GMAW using dimensional analysis – **Welding Journal**. v.81, n.7, p.125-131, jul.2002.

NEVES, C. F. C. et. al. Variables search technique applied to gas separation. **Química Nova**. v.25, n.2, p.327-329, abr/mai. 2002.

NIST. **What is design of experiments (aka DEX or DOE)?**, Engineering Statistics Handbook, National Institute of Standards and Technology, US Department of Commerce, Gaithersburg, MD, 2000.

OLIVEIRA, L. C. **Uso integrado do método QFD e de técnicas estatísticas de planejamento e análise de experimentos na etapa do projeto do produto e do processo**. 1999. Dissertação (Mestrado) – Universidade Federal de Minas Gerais. Belo Horizonte, MG.

PERALTA-ZAMORA, P.; MORAIS, J. L.; NAGATA, N. Por que otimização multivariada?, **Engenharia Sanitária e Ambiental**. v.10, n.2, p.106-110, abr/jun 2005.

PESSOA, E. F., **Estudo Exploratório da Soldagem MIG/MAG com Duplo arame Empregando Corrente Alternada**. 2007. 153p. Dissertação (Mestrado em Engenharia de Materiais e Metalúrgica), Universidade Federal do Ceará. Fortaleza, CE.

PIZZOLATO, M. **Método de Otimização Experimental da Qualidade e Durabilidade de Produtos: Um Estudo de Caso Em Produto Fabricado Por Injeção de Plástico**. 2002. Dissertação (Mestrado em Engenharia de Produção) – Escola de Engenharia, Universidade Federal do Rio Grande do Sul. Porto Alegre RS.

RODRIGUES, L. O.; PAIVA, A. P.; COSTA, S. C. Otimização do processo de soldagem com eletrodo tubular através da análise da geometria do cordão de solda. **Soldagem e Inspeção**. v.13, n.2, p.118-127, abr-jun.2008.

SAMPATH K. Constrains-based modeling Enables successful development of welding electrode specification for critical navy application. **Welding Journal**, p.131-s-8-s. Aug.2005. Disponível em: <<http://img2.aws.org/wj/supplement/08-2005-SAMPATH-s.pdf>> Acesso em 03 set. 2012.

SANCHES, L. C., **Estudo metalurgia e de propriedades mecânicas de soldas GMAW-CW**. 2007. 115p. Trabalho de conclusão de curso (Graduação em Engenharia Mecânica) – Centro Tecnológico, Universidade Federal do Pará. Belém, PA.

SCHNICK, M.; WILHELM G.; LOHSE, M.; FÜSSEL, U.; MURPHY, A. B. Three dimensional modeling of arc in tandem gas metal arc welding using anti-phase pulse synchronization. **Journal of Physics**, v.44, n.18. p.185205-185215, 2011.

SCOTTI, A. A portrait of the welding research in Brazil. **Soldagem e Inspeção**. São Paulo, v.13, n.2, p.160 – 164, abr/jun 2008.

SCOTTI, A., PONOMAREV, V. **Soldagem MIG/MAG: Melhor Entendimento, Melhor Desempenho**. 1 ed. Uberlândia: Artliber, 2008.

SEN, M; MUKHERJEE, M; PAL, T. K. Evaluation of correlations between DP-GMAW process parameters and bead geometry. **Welding Journal**. v.94, p.265-279, Aug. 2015.

SINGLA, M.; SINGH, D.; DEEPAK, D. Parametric optimization of gas metal arc welding processes by using factorial design approach. **Journal of Minerals & Materials Characterization & Engineering**. v.9, n.4, p.353-363, 2010.

SMATI, Z., Automated pulsed MIG Welding. **Metal Construction**, 1985, v.18, p.38–44.

SOUZA, D., RESENDE, A. A., SCOTTI, A. Um modelo qualitativo para explicar a influência da polaridade na taxa de fusão no processo MIG/MAG. **Soldagem e Inspeção**, São Paulo, v.14, n.3, p.192-198, jul/set 2009.

TEIXEIRA, G. S. **Análise da influência dos parâmetros de soldagem sobre a geometria do cordão de solda depositado pelo processo de soldagem TIG – MAG em tandem**. 2011. 122p. Dissertação (Mestrado em Engenharia Mecânica) - Universidade Federal do Rio Grande do Sul. Porto Alegre, RS.

TEWARI, S. P. GUPTA, A., PRAKASH, J. Effect of Welding Parameters on the weldability of material. **International Journal of Engineering Science and Technology**. v.2, n.4, p.512-516, 2010.

THYSSENKRUPP. **Diagrama de fases**. Disponível em: < <http://www.thyssenkrupp.cl/soportetecnico.html/menu-soportetecnico.index/230> >. Acesso em 23/06/2015.

TUŠEK, J. - A mathematical model for the melting rate in welding with a multiple-wire electrode. IOP Science - <http://iopscience.iop.org/0022-3727/32/14/328>. Download em 23/08/2012).

UEYAMA, T. et. al. AC Pulsed GMAW Improves Sheet Metal Joining. **Welding Journal**. New York, v.84 n.2, p.40–46, 2005.

VIEIRA, L. A. **Avaliação da Tenacidade após Tratamento Térmico de Alívio de Tensões em Soldas produzidas com Arames Tubulares Rútílicos que contenham Níquel**. 2006. 79p. Dissertação (Mestrado em Engenharia Mecânica) – Universidade Federal de Minas Gerais. Belo Horizonte, MG.

WAINER, E.; BRANDI, Sérgio D.; MELLO, Fábio D. H. **Soldagem: Processos e Metalurgia**. 4 ed. São Paulo: Edgard Blücher Ltda, 2004.

WEI H. L.; Li, H.; Yang, L. J; Gao, Y. Consumable double electrode with a single arc GMAW. **Journal Advanced Manufacturing Technology**, v.68, p.1539-1550, 2013.

WU, C. S.; HU, Z. H.; ZHONG, L. M. Prevention of humping bead associated with high welding speed by double-electrode gas metal arc welding. **Journal Advanced Manufacturing Technology**, v.63, p.573-581, 2012.

ZEEMANN, A.; LIMA, A. A.; EMYGDIO, P. R. O. Influência do aporte de calor na microestrutura da zona termicamente afetada do aço inoxidável do tipo HK40. **Soldagem & Materiais**, v.4, n.3, p.40-46, 1992.

APÊNDICE A - Planejamento fatorial completo para cada processo proposto.

Duplo Arame (DW)			
Arame 1 - 0,8 mm (Mestra) + Arame 1 - 0,8 mm (Escrava)			
N° CP	Tensão 1 (V)	Corrente 1 (A)	Velocidade de Soldagem (cm/min)
17	19,2	112	28
18	19,2	148	35
19	19,2	148	28
20	24	112	35
21	24	148	28
22	24	112	28
23	19,2	112	35
24	24	148	35
C₁	21,6	130	31,5
C₂	21,6	130	31,5
C₃	21,6	130	31,5
C₄	21,6	130	31,5
C₅	21,6	130	31,5

Arame 2 – 1,0 mm (Mestra) + Arame 2 – 1,0 mm (Escrava)			
N° CP	Tensão (V)	Corrente (A)	Velocidade de Soldagem (cm/min)
25	18,7	127	35
26	18,7	172	35
27	22,4	172	28
28	18,7	172	28
29	22,4	172	35

30	18,7	127	28
31	22,4	127	35
32	22,4	127	28
C₆	20,55	149,5	31,5
C₇	20,55	149,5	31,5
C₈	20,55	149,5	31,5
C₉	20,55	149,5	31,5
C₁₀	20,55	149,5	31,5

Arame 1 – 0,8 mm (Mestra) + Arame 2 – 1,0 mm (Escrava)					
N° CP	Tensão 1 (V)	Corrente 1 (A)	Tensão 2 (V)	Corrente 2 (A)	Velocidade de Soldagem (cm/min)
33	19,2	148	18,7	172	28
34	24	112	22,4	172	28
35	19,2	112	18,7	127	35
36	24	148	22,4	127	28
37	24	112	18,7	172	35
38	19,2	148	18,7	172	35
39	19,2	112	22,4	172	35
40	19,2	148	22,4	127	28
41	24	112	18,7	127	28
42	24	148	22,4	172	28
43	24	112	22,4	172	35
44	24	148	18,7	172	35
45	24	112	22,4	127	35
46	24	112	18,7	172	28

47	19,2	148	22,4	172	35
48	19,2	112	18,7	172	28
49	19,2	112	22,4	127	28
50	24	148	18,7	127	28
51	24	112	22,4	127	28
52	19,2	112	18,7	127	28
53	19,2	112	22,4	172	28
54	24	148	22,4	172	35
55	19,2	148	18,7	127	35
56	19,2	112	22,4	127	35
57	24	148	18,7	127	35
58	24	112	18,7	127	35
59	24	148	18,7	172	28
60	24	148	22,4	127	35
61	19,2	112	18,7	172	35
62	19,2	148	22,4	127	35
63	19,2	148	22,4	172	28
64	19,2	148	18,7	127	28
C₁₁	21,6	130	20,55	149,5	31,5
C₁₂	21,6	130	20,55	149,5	31,5
C₁₃	21,6	130	20,55	149,5	31,5
C₁₄	21,6	130	20,55	149,5	31,5
C₁₅	21,6	130	20,55	149,5	31,5

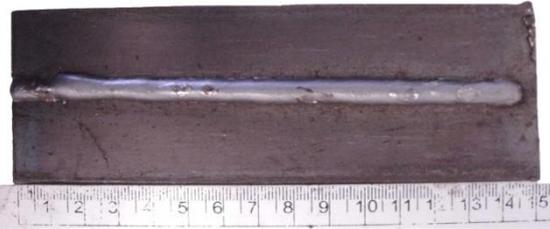
Arame 2 – 1,0 mm (Mestra) + Arame 1 – 0,8 mm (Escrava)					
N° CP	Tensão 2 (V)	Corrente 2 (A)	Tensão 1 (V)	Corrente 1 (A)	Velocidade de Soldagem (cm/min)
65	18,7	127	24,0	148	28
66	22,4	172	24,0	112	35
67	22,4	172	19,2	112	35
68	18,7	127	19,2	112	35
69	18,7	172	19,2	112	28
70	22,4	127	24,0	112	35
71	18,7	172	19,2	148	28
72	22,4	127	24,0	148	28
73	18,7	127	24,0	112	28
74	22,4	172	24,0	148	28
75	18,7	172	24,0	148	28
76	22,4	172	24,0	148	35
77	18,7	127	24,0	112	35
78	22,4	127	24,0	148	35
79	22,4	127	19,2	112	28
80	18,7	172	24,0	148	35
81	22,4	127	19,2	148	35
82	18,7	127	24,0	148	35
83	18,7	172	19,2	112	35
84	18,7	172	24,0	112	28
85	22,4	127	19,2	148	28
86	22,4	127	19,2	112	35
87	22,4	127	24,0	112	28
88	22,4	172	19,2	112	28

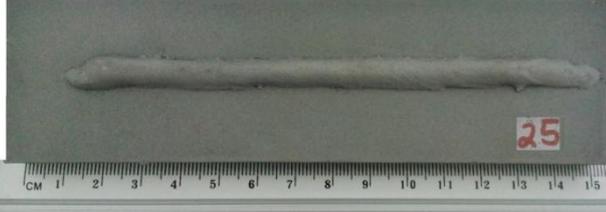
89	18,7	172	19,2	148	35
90	18,7	127	19,2	112	28
91	22,4	172	19,2	148	28
92	18,7	172	24,0	112	35
93	18,7	127	19,2	148	35
94	18,7	127	19,2	148	28
95	22,4	172	24,0	112	28
96	22,4	172	19,2	148	35
C₁₆	20,55	149,5	21,6	130	31,5
C₁₇	20,55	149,5	21,6	130	31,5
C₁₈	20,55	149,5	21,6	130	31,5
C₁₉	20,55	149,5	21,6	130	31,5
C₂₀	20,55	149,5	21,6	130	31,5

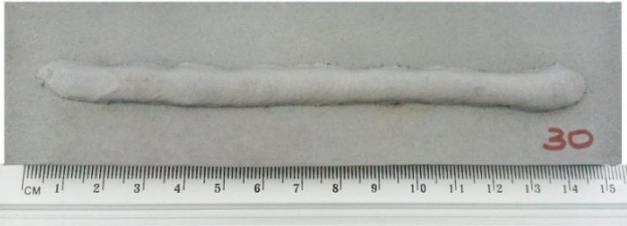
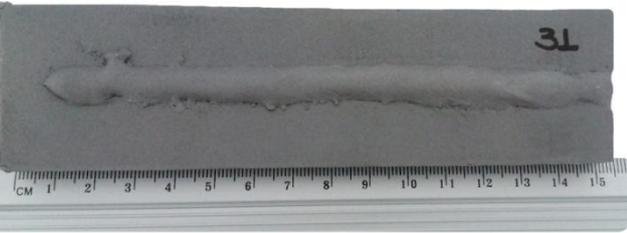
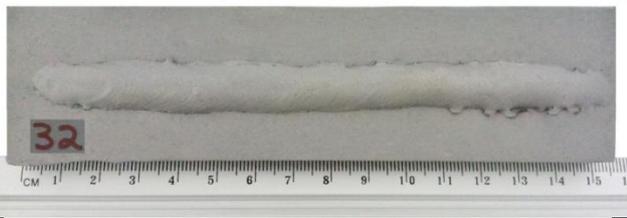
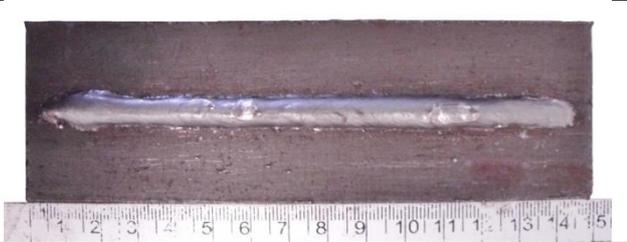
APÊNDICE B - Cordões de Solda realizados pelo processo BOP.

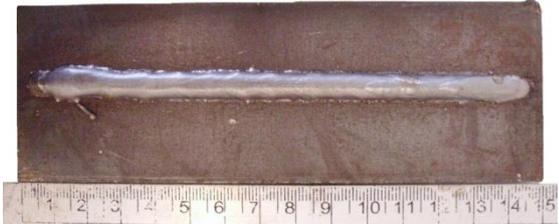
Duplo arame (DW)	
Arame 1 – 0,8 mm (Mestra) + Arame 1 – 0,8 mm (Escrava)	
Nº CP	Cordões
17	 <p>Weld bead 17: A light-colored, slightly irregular weld bead on a grey substrate. A ruler below shows a length of approximately 15 cm. A small red label with the number '17' is on the right.</p>
18	 <p>Weld bead 18: A light-colored, slightly irregular weld bead on a grey substrate. A ruler below shows a length of approximately 15 cm. A small white label with the number '18' is on the right.</p>
19	 <p>Weld bead 19: A light-colored, slightly irregular weld bead on a grey substrate. A ruler below shows a length of approximately 15 cm. A small red label with the number '19' is on the left.</p>
20	 <p>Weld bead 20: A light-colored, slightly irregular weld bead on a grey substrate. A ruler below shows a length of approximately 15 cm. A small white label with the number '20' is on the right.</p>
21	 <p>Weld bead 21: A light-colored, slightly irregular weld bead on a grey substrate. A ruler below shows a length of approximately 15 cm. A small white label with the number '21' is on the right.</p>

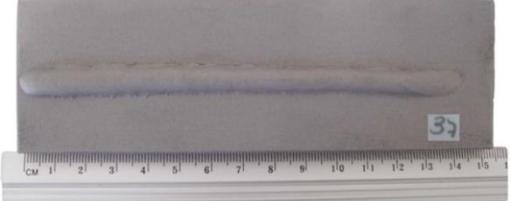
22	
23	
24	
C ₁	
C ₂	
C ₃	

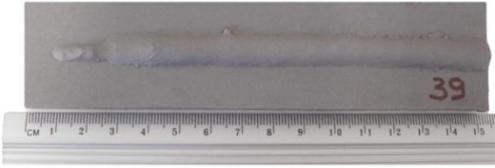
<p>C₄</p>	
<p>C₅</p>	

<p>Arame 2 – 1,0 mm (Mestra) + Arame 2 – 1,0 mm (Escrava)</p>	
<p>Nº CP</p>	<p>Cordões</p>
<p>25</p>	
<p>26</p>	
<p>27</p>	
<p>28</p>	
<p>29</p>	

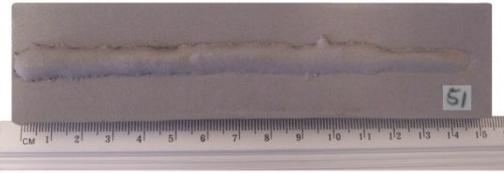
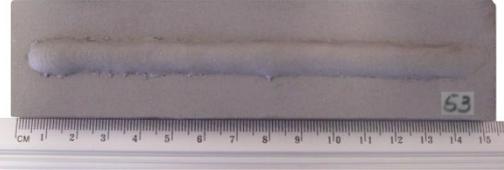
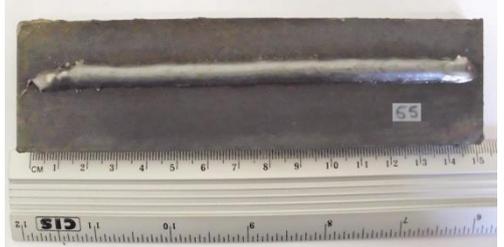
30	
31	
32	
C ₆	
C ₇	
C ₈	
C ₉	

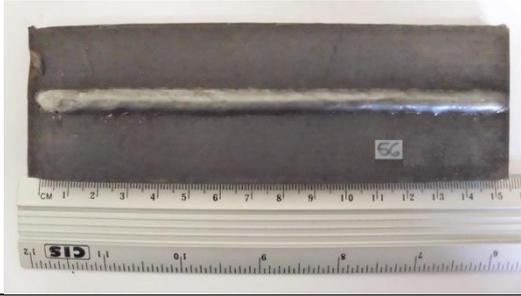
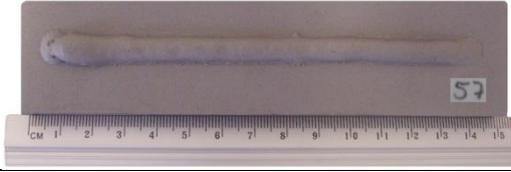
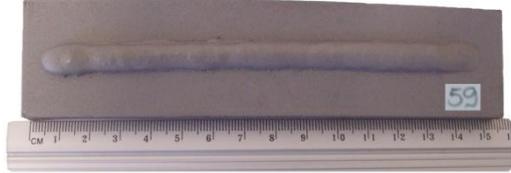
C₁₀	
-----------------------	--

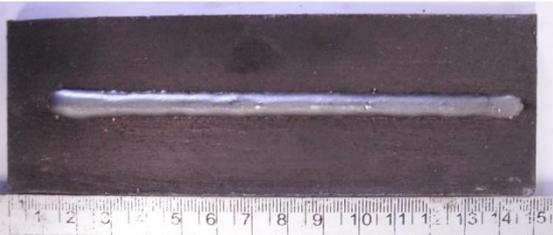
Arame 1 – 0,8 mm (Mestra) + Arame 2 – 1,0 mm (Escrava)	
N° CP	Cordões
33	
34	
35	
36	
37	

<p>38</p>	
<p>39</p>	
<p>40</p>	
<p>41</p>	
<p>42</p>	
<p>43</p>	

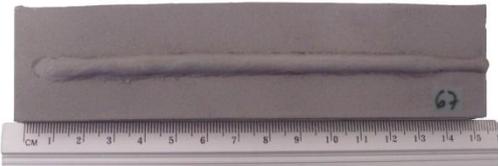
44	 A photograph of a dark metal specimen with a horizontal groove. The specimen is labeled with the number '44' in a small white box on the right side. Below the specimen is a ruler with markings in centimeters and millimeters. The ruler has 'SID' printed on it.
45	 A photograph of a dark metal specimen with a horizontal groove. The specimen is labeled with the number '45' in a small white box on the right side. Below the specimen is a ruler with markings in centimeters and millimeters. The ruler has 'SID' printed on it.
46	 A photograph of a dark metal specimen with a horizontal groove. The specimen is labeled with the number '46' in a small white box on the right side. Below the specimen is a ruler with markings in centimeters and millimeters. The ruler has 'SID' printed on it.
47	 A photograph of a dark metal specimen with a horizontal groove. The specimen is labeled with the number '47' in a small white box on the right side. Below the specimen is a ruler with markings in centimeters and millimeters. The ruler has 'SID' printed on it.
48	 A photograph of a dark metal specimen with a horizontal groove. The specimen is labeled with the number '48' in a small white box on the right side. Below the specimen is a ruler with markings in centimeters and millimeters. The ruler has 'SID' printed on it.
49	 A photograph of a dark metal specimen with a horizontal groove. The specimen is labeled with the number '49' in a small white box on the right side. Below the specimen is a ruler with markings in centimeters and millimeters. The ruler has 'SID' printed on it.

50	
51	
52	
53	
54	
55	

56	
57	
58	
59	
60	
61	
62	

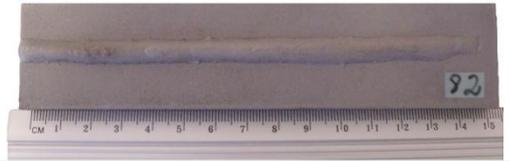
63	
64	
C₁₁	
C₁₂	
C₁₃	
C₁₄	

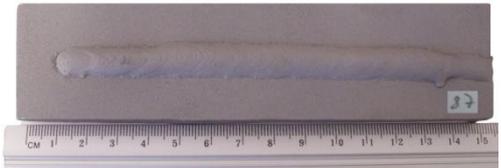
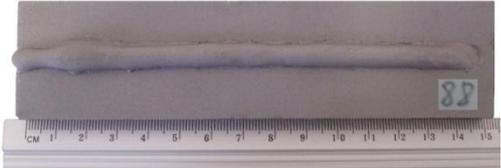
C ₁₅	
-----------------	--

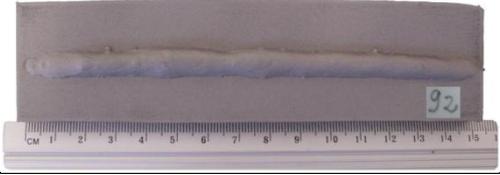
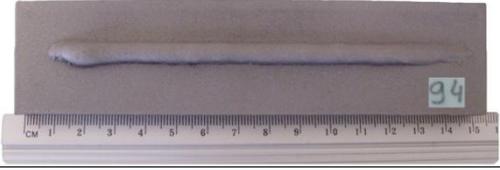
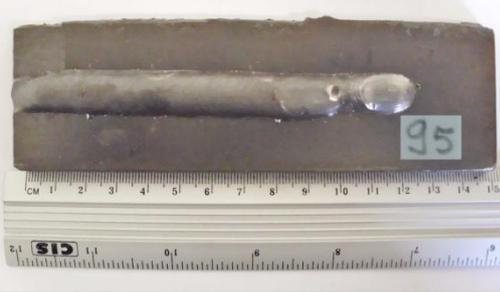
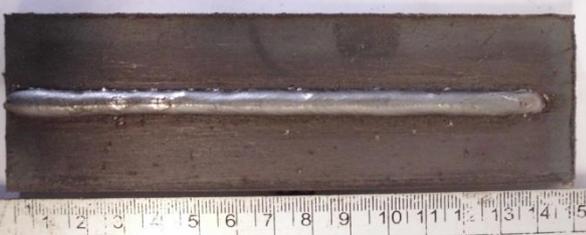
Arame 2 – 1,0 mm (Mestra) + Arame 1 – 0,8 mm (Escrava)	
N° CP	Cordões
65	
66	
67	
68	

<p>69</p>	
<p>70</p>	
<p>71</p>	
<p>72</p>	
<p>73</p>	

<p>74</p>	
<p>75</p>	
<p>76</p>	
<p>77</p>	
<p>78</p>	
<p>79</p>	

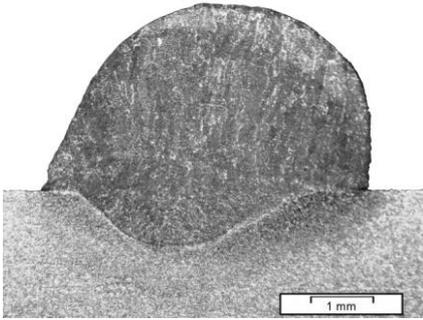
<p>80</p>	
<p>81</p>	
<p>82</p>	
<p>83</p>	
<p>84</p>	
<p>85</p>	

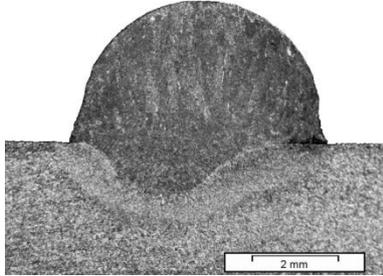
<p>86</p>	
<p>87</p>	
<p>88</p>	
<p>89</p>	
<p>90</p>	
<p>91</p>	

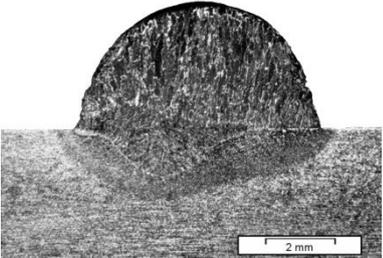
92	
93	
94	
95	
96	
C16	

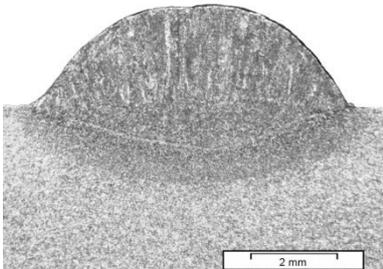
C₁₇	
C₁₈	
C₁₉	
C₂₀	

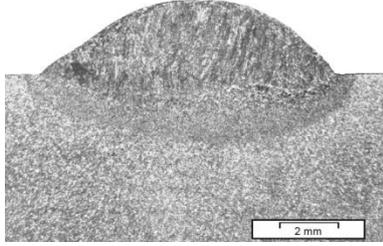
APÊNDICE C - Parâmetros geométricos dos corpos de prova

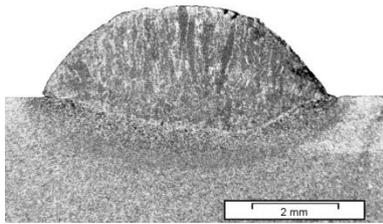
Processo Duplo Arame (DW)				
Arame 1 - 0,8mm (Mestra) + Arame 1 - 0,8mm (Escrava)				
N° CP	Imagem	Parâmetros de soldagem e Parâmetros Geométricos		
		Tensão (V)	Corrente (A)	Velocidade de Soldagem (cm/min)
17		19,2	112	28
		Altura (mm)	Largura Cordão (mm)	Penetração Cordão (mm)
		3,053	5,284	0,943
		Taxa de diluição (%)	Largura ZTA (mm)	Penetração ZTA (mm)
		20,755	0,530	0,138

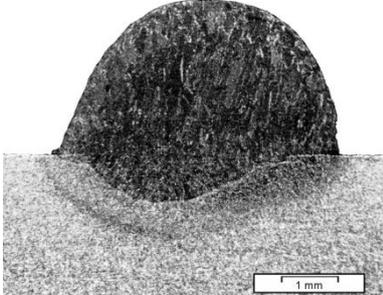
18		Tensão (V)	Corrente (A)	Velocidade de Soldagem (cm/min)
		19,2	148	35
		Altura (mm)	Largura Cordão (mm)	Penetração Cordão (mm)
		3,319	6,010	1,263
		Taxa de diluição (%)	Largura ZTA (mm)	Penetração ZTA (mm)
		18,844	0,593	0,63

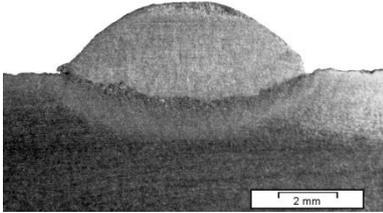
19		Tensão (V)	Corrente (A)	Velocidade de Soldagem (cm/min)
		19,2	148	28
		Altura (mm)	Largura Cordão (mm)	Penetração Cordão (mm)
		3,698	7,172	1,453
		Taxa de diluição (%)	Largura ZTA (mm)	Penetração ZTA (mm)
		19,520	0,860	0,636

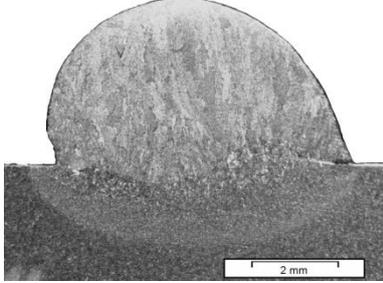
20		Tensão (V)	Corrente (A)	Velocidade de Soldagem (cm/min)
		24	112	35
		Altura (mm)	Largura Cordão (mm)	Penetração Cordão (mm)
		2,387	7,576	0,987
		Taxa de diluição (%)	Largura ZTA (mm)	Penetração ZTA (mm)
		2,462	0,773	0,814

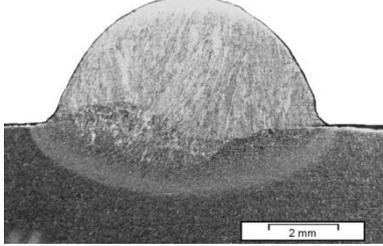
21		Tensão (V)	Corrente (A)	Velocidade de Soldagem (cm/min)
		24	148	28
		Altura (mm)	Largura Cordão (mm)	Penetração Cordão (mm)
		2,547	10,109	1,289
		Taxa de diluição (%)	Largura ZTA (mm)	Penetração ZTA (mm)
		29,468	1,159	1,198

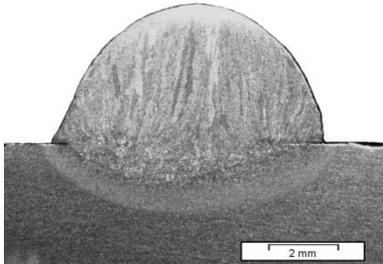
22		Tensão (V)	Corrente (A)	Velocidade de Soldagem (cm/min)
		24	112	28
		Altura (mm)	Largura Cordão (mm)	Penetração Cordão (mm)
		2,160	6,569	0,800
		Taxa de diluição (%)	Largura ZTA (mm)	Penetração ZTA (mm)
		25,237	1,035	0,400

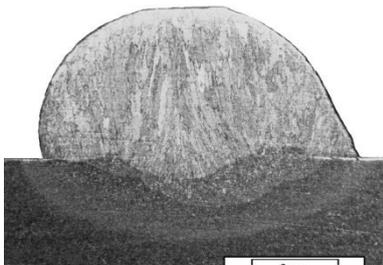
23		Tensão (V)	Corrente (A)	Velocidade de Soldagem (cm/min)
		19,2	112	35
		Altura (mm)	Largura Cordão (mm)	Penetração Cordão (mm)
		2,782	5,120	0,869
		Taxa de diluição (%)	Largura ZTA (mm)	Penetração ZTA (mm)
		20,453	0,360	0,588

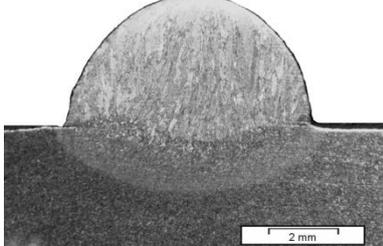
24		Tensão (V)	Corrente (A)	Velocidade de Soldagem (cm/min)
		24	148	35
		Altura (mm)	Largura Cordão (mm)	Penetração Cordão (mm)
		2,416	8,455	1,066
		Taxa de diluição (%)	Largura ZTA (mm)	Penetração ZTA (mm)
		26,989	0,731	0,203

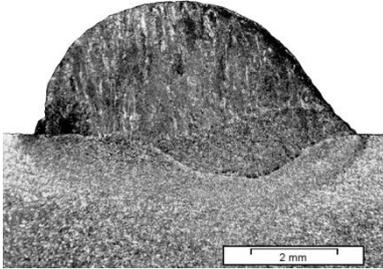
C ₁		Tensão (V)	Corrente (A)	Velocidade de Soldagem (cm/min)
		21,6	130	31,5
		Altura (mm)	Largura Cordão (mm)	Penetração Cordão (mm)
		3,926	6,900	0,435
		Taxa de diluição (%)	Largura ZTA (mm)	Penetração ZTA (mm)
		9,850	0,780	0,704

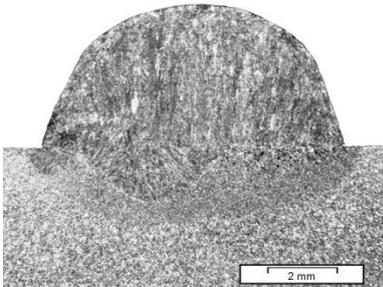
C ₂		Tensão (V)	Corrente (A)	Velocidade de Soldagem (cm/min)
		21,6	130	31,5
		Altura (mm)	Largura Cordão (mm)	Penetração Cordão (mm)
		3,724	8,093	1,273
		Taxa de diluição (%)	Largura ZTA (mm)	Penetração ZTA (mm)
		15,321	0,808	0,378

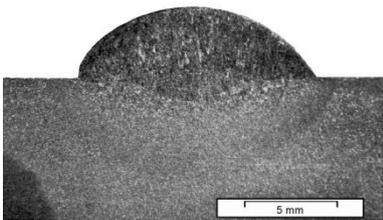
C₃		Tensão (V)	Corrente (A)	Velocidade de Soldagem (cm/min)
		21,6	130	31,5
		Altura (mm)	Largura Cordão (mm)	Penetração Cordão (mm)
		4,076	7,817	1,178
		Taxa de diluição (%)	Largura ZTA (mm)	Penetração ZTA (mm)
		14,116	0,878	0,206

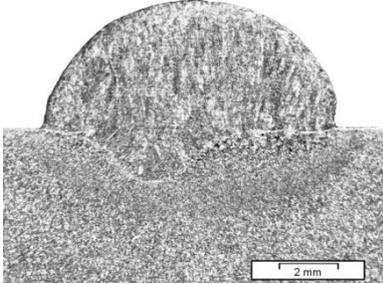
C₄		Tensão (V)	Corrente (A)	Velocidade de Soldagem (cm/min)
		21,6	130	31,5
		Altura (mm)	Largura Cordão (mm)	Penetração Cordão (mm)
		3,567	7,280	1,038
		Taxa de diluição (%)	Largura ZTA (mm)	Penetração ZTA (mm)
		14,115	0,874	0,198

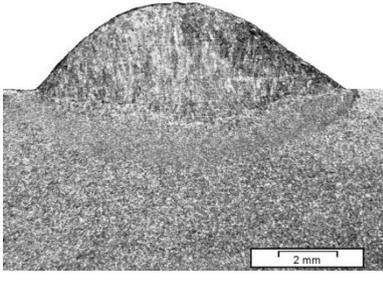
C ₅		Tensão (V)	Corrente (A)	Velocidade de Soldagem (cm/min)
		21,6	130	31,5
		Altura (mm)	Largura Cordão (mm)	Penetração Cordão (mm)
		3,793	7,086	1,109
		Taxa de diluição (%)	Largura ZTA (mm)	Penetração ZTA (mm)
		17,415	0,709	0,295

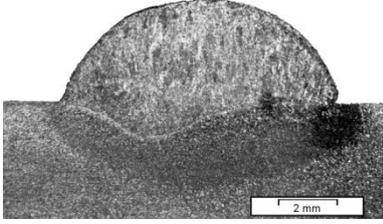
Processo Duplo Arame (DW)				
Arame 2 – 1,0mm (Mestre) + Arame 2 – 1,0mm (Escravo)				
N° CP	Imagem	Parâmetros Geométricos		
25		Tensão (V)	Corrente (A)	Velocidade de Soldagem (cm/min)
		18,7	127	35
		Altura (mm)	Largura Cordão (mm)	Penetração Cordão (mm)
		3,126	7,500	1,042
		Taxa de diluição (%)	Largura ZTA (mm)	Penetração ZTA (mm)
		21,345	0,683	0,328

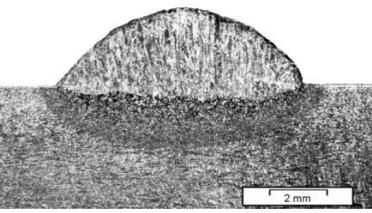
26		Tensão (V)	Corrente (A)	Velocidade de Soldagem (cm/min)
		18,7	172	35
		Altura (mm)	Largura Cordão (mm)	Penetração Cordão (mm)
		4,188	8,686	1,557
		Taxa de diluição (%)	Largura ZTA (mm)	Penetração ZTA (mm)
		21,599	0,502	0,688

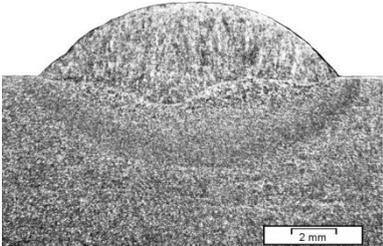
27		Tensão (V)	Corrente (A)	Velocidade de Soldagem (cm/min)
		22,4	172	28
		Altura (mm)	Largura Cordão (mm)	Penetração Cordão (mm)
		3,864	12,880	1,320
		Taxa de diluição (%)	Largura ZTA (mm)	Penetração ZTA (mm)
		21,412	0,632	0,910

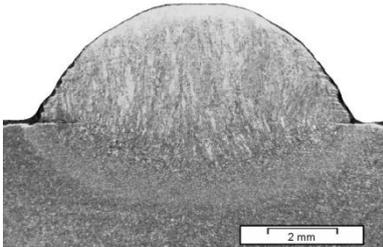
28		Tensão (V)	Corrente (A)	Velocidade de Soldagem (cm/min)
		18,7	172	28
		Altura (mm)	Largura Cordão (mm)	Penetração Cordão (mm)
		4,415	10,089	1,888
		Taxa de diluição (%)	Largura ZTA (mm)	Penetração ZTA (mm)
22,897	0,786	0,436		

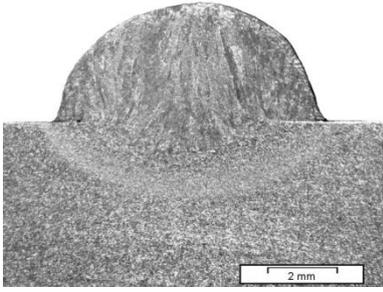
29		Tensão (V)	Corrente (A)	Velocidade de Soldagem (cm/min)
		22,4	172	35
		Altura (mm)	Largura Cordão (mm)	Penetração Cordão (mm)
		2,984	10,566	1,218
		Taxa de diluição (%)	Largura ZTA (mm)	Penetração ZTA (mm)
27,19	0,538	0,501		

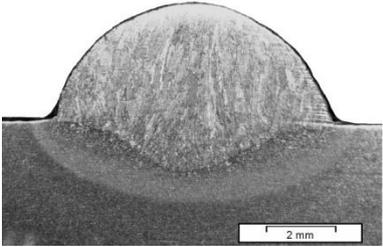
30		Tensão (V)	Corrente (A)	Velocidade de Soldagem (cm/min)
		18,7	127	28
		Altura (mm)	Largura Cordão (mm)	Penetração Cordão (mm)
		3,512	9,409	1,228
		Taxa de diluição (%)	Largura ZTA (mm)	Penetração ZTA (mm)
21,662	0,634	0,223		

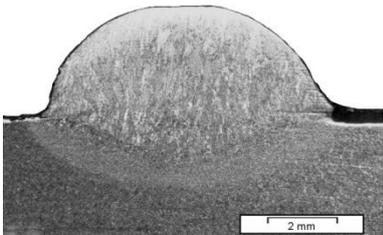
31		Tensão (V)	Corrente (A)	Velocidade de Soldagem (cm/min)
		22,4	127	35
		Altura (mm)	Largura Cordão (mm)	Penetração Cordão (mm)
		2,720	8,607	0,599
		Taxa de diluição (%)	Largura ZTA (mm)	Penetração ZTA (mm)
24,432	0,700	0,599		

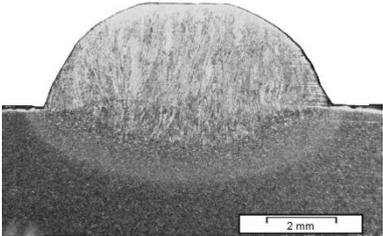
32		Tensão (V)	Corrente (A)	Velocidade de Soldagem (cm/min)
		22,4	127	28
		Altura (mm)	Largura Cordão (mm)	Penetração Cordão (mm)
		3,332	13,383	1,293
		Taxa de diluição (%)	Largura ZTA (mm)	Penetração ZTA (mm)
		28,436	0,674	1,226

C ₆		Tensão (V)	Corrente (A)	Velocidade de Soldagem (cm/min)
		20,55	149,5	31,5
		Altura (mm)	Largura Cordão (mm)	Penetração Cordão (mm)
		3,440	9,047	1,290
		Taxa de diluição (%)	Largura ZTA (mm)	Penetração ZTA (mm)
		18,661	0,503	0,580

C₇		Tensão (V)	Corrente (A)	Velocidade de Soldagem (cm/min)
		20,55	149,5	31,5
		Altura (mm)	Largura Cordão (mm)	Penetração Cordão (mm)
		3,466	7,895	1,299
		Taxa de diluição (%)	Largura ZTA (mm)	Penetração ZTA (mm)
		14,150	0,527	0,552

C₈		Tensão (V)	Corrente (A)	Velocidade de Soldagem (cm/min)
		20,55	149,5	31,5
		Altura (mm)	Largura Cordão (mm)	Penetração Cordão (mm)
		3,388	8,084	1,514
		Taxa de diluição (%)	Largura ZTA (mm)	Penetração ZTA (mm)
		18,203	0,419	0,443

C₉		Tensão (V)	Corrente (A)	Velocidade de Soldagem (cm/min)
		20,55	149,5	31,5
		Altura (mm)	Largura Cordão (mm)	Penetração Cordão (mm)
		3,268	8,437	1,032
		Taxa de diluição (%)	Largura ZTA (mm)	Penetração ZTA (mm)
		16,920	0,374	0,494

C₁₀		Tensão (V)	Corrente (A)	Velocidade de Soldagem (cm/min)
		20,55	149,5	31,5
		Altura (mm)	Largura Cordão (mm)	Penetração Cordão (mm)
		3,019	8,204	1,213
		Taxa de diluição (%)	Largura ZTA (mm)	Penetração ZTA (mm)
		16,011	0,550	0,508

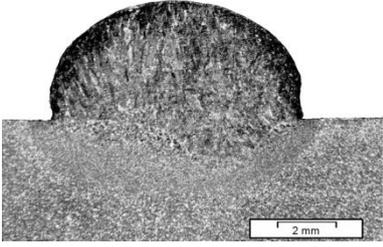
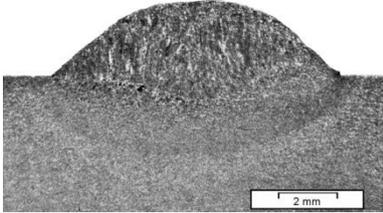
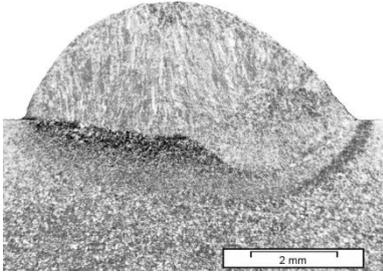
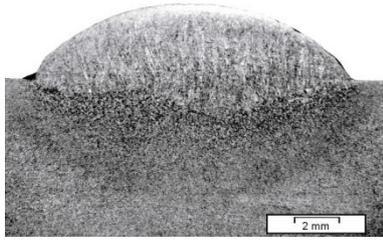
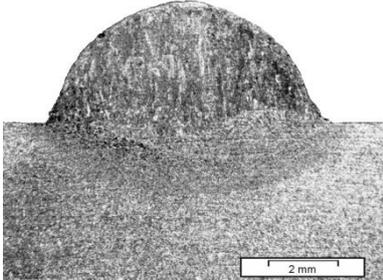
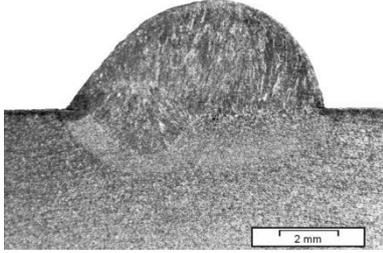
Processo Duplo Arame (DW)						
Arame 1 - 0,8mm (Mestre) + Arame 2 - 1,0mm (Escrava)						
N° CP	Imagem	Parâmetros Geométricos				
		Tensão (V)		Corrente (A)	Velocidade de Soldagem (cm/min)	
		T _M	T _E	C _M		C _E
33		19,2	148	18,7	172	28
		Altura (mm)	Largura Cordão (mm)		Penetração Cordão (mm)	
		4,080	8,587		1,482	
		Taxa de diluição (%)	Largura ZTA (mm)		Penetração ZTA (mm)	
		11,948	0,718		0,508	

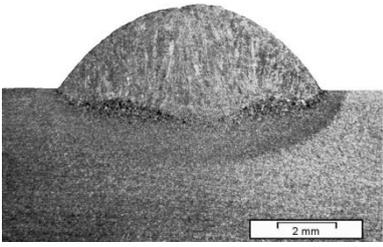
	Imagem	Tensão (V)		Corrente (A)	Velocidade de Soldagem (cm/min)	
		T _M	T _E	C _M		C _E
34		24	112	22,4	172	28
		Altura (mm)	Largura Cordão (mm)		Penetração Cordão (mm)	
		2,609	9,896		0,914	
		Taxa de diluição (%)	Largura ZTA (mm)		Penetração ZTA (mm)	
		18,671	0,564		0,639	

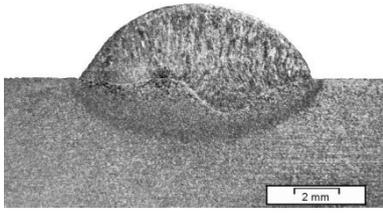
35		Tensão (V)		Corrente (A)		Velocidade de Soldagem (cm/min)
		T_M	T_E	C_M	C_E	
		19,2	112	18,7	127	35
		Altura (mm)		Largura Cordão (mm)		Penetração Cordão (mm)
		2,753		7,873		1,290
		Taxa de diluição (%)		Largura ZTA (mm)		Penetração ZTA (mm)
		24,462		0,524		0,635

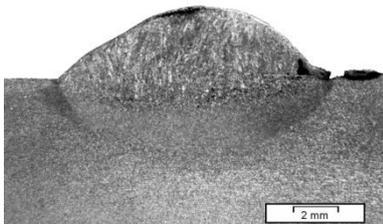
36		Tensão (V)		Corrente (A)		Velocidade de Soldagem (cm/min)
		T_M	T_E	C_M	C_E	
		24	148	22,4	127	28
		Altura (mm)		Largura Cordão (mm)		Penetração Cordão (mm)
		3,439		14,316		1,773
		Taxa de diluição (%)		Largura ZTA (mm)		Penetração ZTA (mm)
		19,201		0,760		1,013

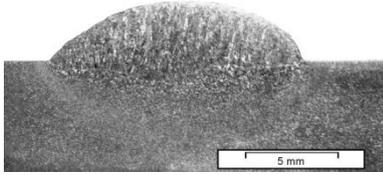
37		Tensão (V)		Corrente (A)		Velocidade de Soldagem (cm/min)
		T_M	T_E	C_M	C_E	
		24	112	18,7	172	35
		Altura (mm)		Largura Cordão (mm)		Penetração Cordão (mm)
		3,578		8,204		1,109
		Taxa de diluição (%)		Largura ZTA (mm)		Penetração ZTA (mm)
		15,988		0,559		0,662

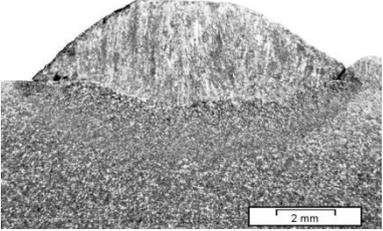
38		Tensão (V)		Corrente (A)		Velocidade de Soldagem (cm/min)
		T_M	T_E	C_M	C_E	
		19,2	148	18,7	172	35
		Altura (mm)		Largura Cordão (mm)		Penetração Cordão (mm)
		3,735		8,851		1,583
		Taxa de diluição (%)		Largura ZTA (mm)		Penetração ZTA (mm)
		14,777		0,802		0,751

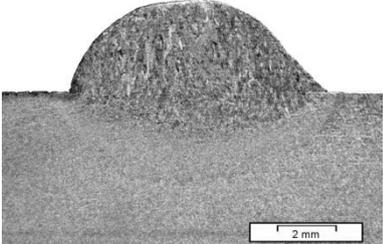
39		Tensão (V)		Corrente (A)		Velocidade de Soldagem (cm/min)
		T_M	T_E	C_M	C_E	
		19,2	112	22,4	172	35
		Altura (mm)		Largura Cordão (mm)		Penetração Cordão (mm)
		2,913		9,105		1,167
		Taxa de diluição (%)		Largura ZTA (mm)		Penetração ZTA (mm)
		18,757		0,751		0,365

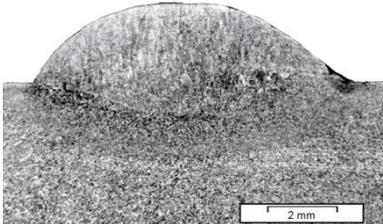
40		Tensão (V)		Corrente (A)		Velocidade de Soldagem (cm/min)
		T_M	T_E	C_M	C_E	
		19,2	148	22,4	127	28
		Altura (mm)		Largura Cordão (mm)		Penetração Cordão (mm)
		3,319		10,437		1,613
		Taxa de diluição (%)		Largura ZTA (mm)		Penetração ZTA (mm)
		15,715		0,524		0,702

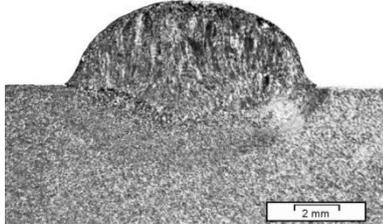
41		Tensão (V)		Corrente (A)		Velocidade de Soldagem (cm/min)
		T_M	T_E	C_M	C_E	
		24	112	18,7	127	28
		Altura (mm)		Largura Cordão (mm)		Penetração Cordão (mm)
		3,306		12,210		1,053
		Taxa de diluição (%)		Largura ZTA (mm)		Penetração ZTA (mm)
		14,710		0,560		0,565

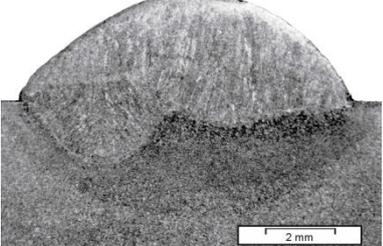
42		Tensão (V)		Corrente (A)		Velocidade de Soldagem (cm/min)
		T_M	T_E	C_M	C_E	
		24	148	22,4	172	28
		Altura (mm)		Largura Cordão (mm)		Penetração Cordão (mm)
		3,220		13,717		1,143
		Taxa de diluição (%)		Largura ZTA (mm)		Penetração ZTA (mm)
		15,525		0,644		0,821

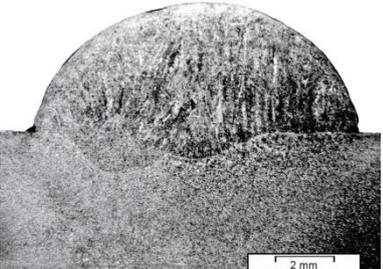
43		Tensão (V)		Corrente (A)		Velocidade de Soldagem (cm/min)
		T_M	T_E	C_M	C_E	
		24	112	22,4	172	35
		Altura (mm)		Largura Cordão (mm)		Penetração Cordão (mm)
		2,822		10,749		0,974
		Taxa de diluição (%)		Largura ZTA (mm)		Penetração ZTA (mm)
		17,211		0,548		0,822

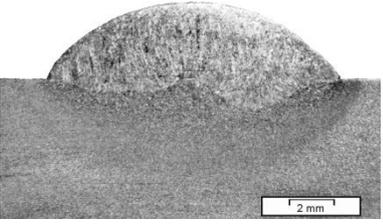
44		Tensão (V)		Corrente (A)		Velocidade de Soldagem (cm/min)
		T_M	T_E	C_M	C_E	
		24	148	18,7	172	35
		Altura (mm)		Largura Cordão (mm)		Penetração Cordão (mm)
		3,187		8,810		1,228
		Taxa de diluição (%)		Largura ZTA (mm)		Penetração ZTA (mm)
		18,979		0,731		0,426

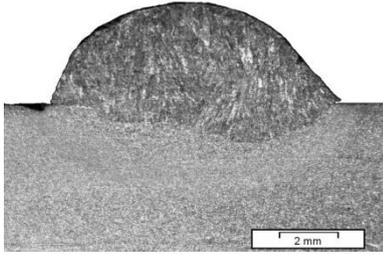
45		Tensão (V)		Corrente (A)		Velocidade de Soldagem (cm/min)
		T_M	T_E	C_M	C_E	
		24	112	22,4	127	35
		Altura (mm)		Largura Cordão (mm)		Penetração Cordão (mm)
		2,330		9,133		0,972
		Taxa de diluição (%)		Largura ZTA (mm)		Penetração ZTA (mm)
		22,331		0,525		0,860

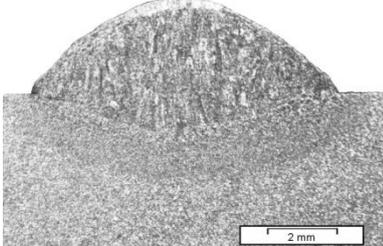
46		Tensão (V)		Corrente (A)		Velocidade de Soldagem (cm/min)
		T_M	T_E	C_M	C_E	
		24	112	18,7	172	28
		Altura (mm)		Largura Cordão (mm)		Penetração Cordão (mm)
		3,852		11,304		1,733
		Taxa de diluição (%)		Largura ZTA (mm)		Penetração ZTA (mm)
		17,681		0,600		0,746

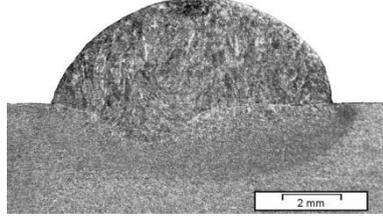
47		Tensão (V)		Corrente (A)		Velocidade de Soldagem (cm/min)
		T_M	T_E	C_M	C_E	
		19,2	148	22,4	172	35
		Altura (mm)		Largura Cordão (mm)		Penetração Cordão (mm)
		3,096		9,744		1,840
		Taxa de diluição (%)		Largura ZTA (mm)		Penetração ZTA (mm)
		21,320		0,554		0,580

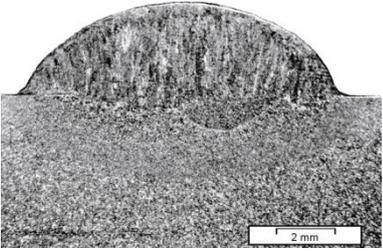
48		Tensão (V)		Corrente (A)		Velocidade de Soldagem (cm/min)
		T_M	T_E	C_M	C_E	
		19,2	112	18,7	172	28
		Altura (mm)		Largura Cordão (mm)		Penetração Cordão (mm)
		4,466		11,155		1,451
		Taxa de diluição (%)		Largura ZTA (mm)		Penetração ZTA (mm)
		11,822		1,066		0,746

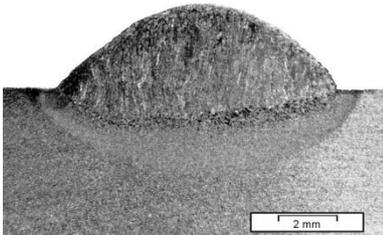
49		Tensão (V)		Corrente (A)		Velocidade de Soldagem (cm/min)
		T_M	T_E	C_M	C_E	
		19,2	112	22,4	127	28
		Altura (mm)		Largura Cordão (mm)		Penetração Cordão (mm)
		3,452		13,197		1,573
		Taxa de diluição (%)		Largura ZTA (mm)		Penetração ZTA (mm)
		15,680		0,600		0.353

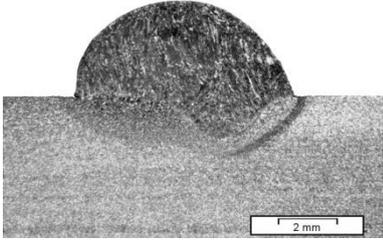
50		Tensão (V)		Corrente (A)		Velocidade de Soldagem (cm/min)
		T_M	T_E	C_M	C_E	
		24	148	18,7	127	28
		Altura (mm)		Largura Cordão (mm)		Penetração Cordão (mm)
		3,481		9,703		1,350
		Taxa de diluição (%)		Largura ZTA (mm)		Penetração ZTA (mm)
		17,697		0,675		0,609

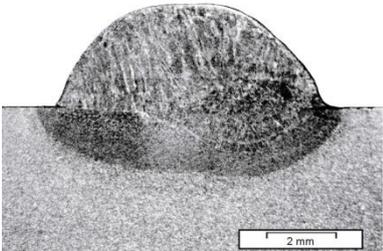
51		Tensão (V)		Corrente (A)		Velocidade de Soldagem (cm/min)
		T_M	T_E	C_M	C_E	
		24	112	22,4	127	28
		Altura (mm)		Largura Cordão (mm)		Penetração Cordão (mm)
		2,812		8,884		1,118
		Taxa de diluição (%)		Largura ZTA (mm)		Penetração ZTA (mm)
		19,326		0,619		0,705

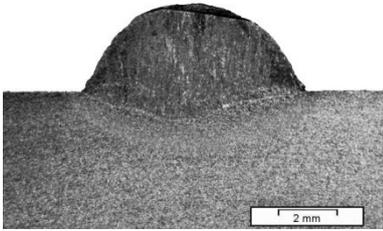
52		Tensão (V)		Corrente (A)		Velocidade de Soldagem (cm/min)
		T_M	T_E	C_M	C_E	
		19,2	112	18,7	127	28
		Altura (mm)		Largura Cordão (mm)		Penetração Cordão (mm)
		3,624		9,602		1,340
		Taxa de diluição (%)		Largura ZTA (mm)		Penetração ZTA (mm)
		11,714		0,629		0,650

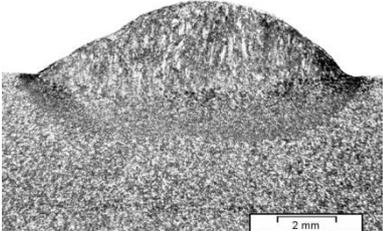
53		Tensão (V)		Corrente (A)		Velocidade de Soldagem (cm/min)
		T_M	T_E	C_M	C_E	
		19,2	112	22,4	172	28
		Altura (mm)		Largura Cordão (mm)		Penetração Cordão (mm)
		3,187		11,094		1,248
		Taxa de diluição (%)		Largura ZTA (mm)		Penetração ZTA (mm)
		13,792		0,639		0,597

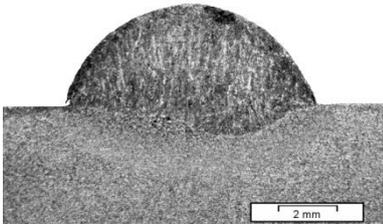
54		Tensão (V)		Corrente (A)		Velocidade de Soldagem (cm/min)
		T_M	T_E	C_M	C_E	
		24	148	22,4	172	35
		Altura (mm)		Largura Cordão (mm)		Penetração Cordão (mm)
		2,923		9,582		1,208
		Taxa de diluição (%)		Largura ZTA (mm)		Penetração ZTA (mm)
		20,477		0,548		0,396

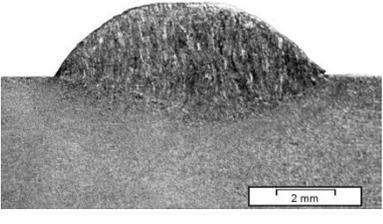
55		Tensão (V)		Corrente (A)		Velocidade de Soldagem (cm/min)
		T_M	T_E	C_M	C_E	
		19,2	148	18,7	127	35
		Altura (mm)		Largura Cordão (mm)		Penetração Cordão (mm)
		3,278		7,541		1,451
		Taxa de diluição (%)		Largura ZTA (mm)		Penetração ZTA (mm)
		13,966		0,203		0,660

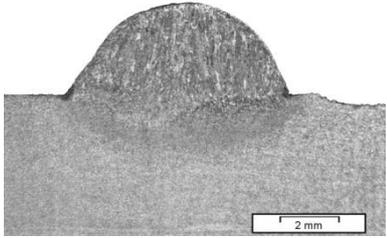
56		Tensão (V)		Corrente (A)		Velocidade de Soldagem (cm/min)
		T_M	T_E	C_M	C_E	
		19,2	112	22,4	127	35
		Altura (mm)		Largura Cordão (mm)		Penetração Cordão (mm)
		2,984		7,835		1,084
		Taxa de diluição (%)		Largura ZTA (mm)		Penetração ZTA (mm)
		15,242		0,344		0,559

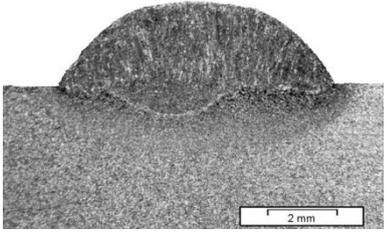
57		Tensão (V)		Corrente (A)		Velocidade de Soldagem (cm/min)
		T_M	T_E	C_M	C_E	
		24	148	18,7	127	35
		Altura (mm)		Largura Cordão (mm)		Penetração Cordão (mm)
		3,025		7,673		1,056
		Taxa de diluição (%)		Largura ZTA (mm)		Penetração ZTA (mm)
		16,691		0,914		0,528

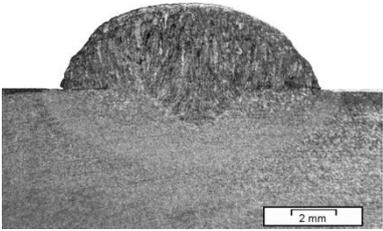
58		Tensão (V)		Corrente (A)		Velocidade de Soldagem (cm/min)
		T_M	T_E	C_M	C_E	
		24	112	18,7	127	35
		Altura (mm)		Largura Cordão (mm)		Penetração Cordão (mm)
		2,578		10,840		1,076
		Taxa de diluição (%)		Largura ZTA (mm)		Penetração ZTA (mm)
		18,658		0,904		0,741

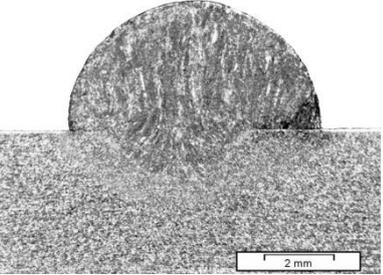
59		Tensão (V)		Corrente (A)		Velocidade de Soldagem (cm/min)
		T_M	T_E	C_M	C_E	
		24	148	18,7	172	28
		Altura (mm)		Largura Cordão (mm)		Penetração Cordão (mm)
		3,492		8,587		1,045
		Taxa de diluição (%)		Largura ZTA (mm)		Penetração ZTA (mm)
		13,263		0,590		0,493

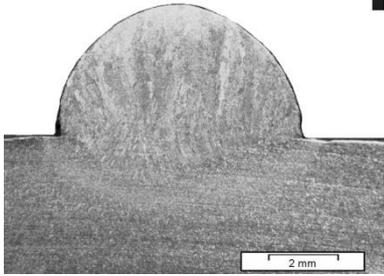
60		Tensão (V)		Corrente (A)		Velocidade de Soldagem (cm/min)
		T_M	T_E	C_M	C_E	
		24	22,4	148	127	35
		Altura (mm)		Largura Cordão (mm)		Penetração Cordão (mm)
		2,497		9,318		1,563
		Taxa de diluição (%)		Largura ZTA (mm)		Penetração ZTA (mm)
		23,145		0,791		0,467

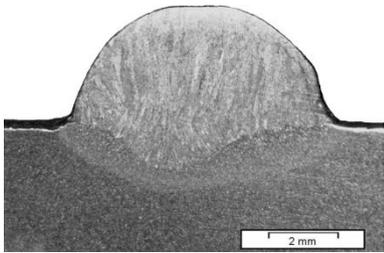
61		Tensão (V)		Corrente (A)		Velocidade de Soldagem (cm/min)
		T_M	T_E	C_M	C_E	
		19,2	112	18,7	172	35
		Altura (mm)		Largura Cordão (mm)		Penetração Cordão (mm)
		3,197		7,643		1,157
		Taxa de diluição (%)		Largura ZTA (mm)		Penetração ZTA (mm)
		12,783		0,522		0,409

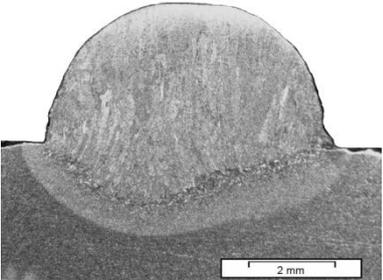
62		Tensão (V)		Corrente (A)		Velocidade de Soldagem (cm/min)
		T_M	T_E	C_M	C_E	
		19,2	148	22,4	127	35
		Altura (mm)		Largura Cordão (mm)		Penetração Cordão (mm)
		2,399		7,972		0,886
		Taxa de diluição (%)		Largura ZTA (mm)		Penetração ZTA (mm)
		15,584		0,542		0,439

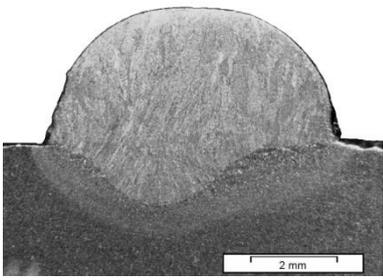
63		Tensão (V)		Corrente (A)		Velocidade de Soldagem (cm/min)
		T_M	T_E	C_M	C_E	
		19,2	148	22,4	172	28
		Altura (mm)		Largura Cordão (mm)		Penetração Cordão (mm)
		3,892		11,464		1,693
		Taxa de diluição (%)		Largura ZTA (mm)		Penetração ZTA (mm)
		13,137		0,426		0,466

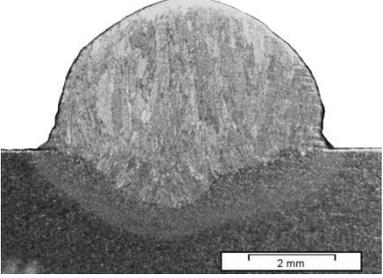
64		Tensão (V)		Corrente (A)		Velocidade de Soldagem (cm/min)
		T_M	T_E	C_M	C_E	
		19,2	148	18,7	127	28
		Altura (mm)		Largura Cordão (mm)		Penetração Cordão (mm)
		3,741		7,293		1,350
		Taxa de diluição (%)		Largura ZTA (mm)		Penetração ZTA (mm)
		13,578		0,443		0,464

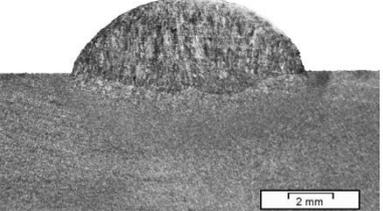
C ₁₁		Tensão (V)		Corrente (A)		Velocidade de Soldagem (cm/min)
		T_M	T_E	C_M	C_E	
		21,6	130	20,55	149,5	31,5
		Altura (mm)		Largura Cordão (mm)		Penetração Cordão (mm)
		3,836		6,975		1,436
		Taxa de diluição (%)		Largura ZTA (mm)		Penetração ZTA (mm)
		15,828		0,503		0,417

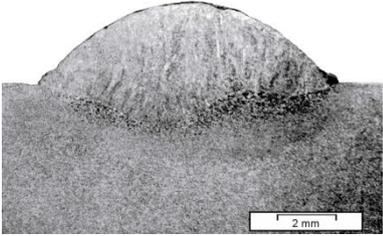
C ₁₂		Tensão (V)		Corrente (A)		Velocidade de Soldagem (cm/min)
		T_M	T_E	C_M	C_E	
		21,6	130	20,55	149,5	31,5
		Altura (mm)		Largura Cordão (mm)		Penetração Cordão (mm)
		3,363		7,516		1,359
		Taxa de diluição (%)		Largura ZTA (mm)		Penetração ZTA (mm)
		14,856		0,486		0,503

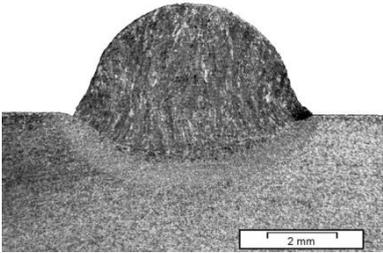
C ₁₃		Tensão (V)		Corrente (A)		Velocidade de Soldagem (cm/min)
		T_M	T_E	C_M	C_E	
		21,6	130	20,55	149,5	31,5
		Altura (mm)		Largura Cordão (mm)		Penetração Cordão (mm)
		3,264		6,762		1,456
		Taxa de diluição (%)		Largura ZTA (mm)		Penetração ZTA (mm)
		17,525		0,462		0,3362

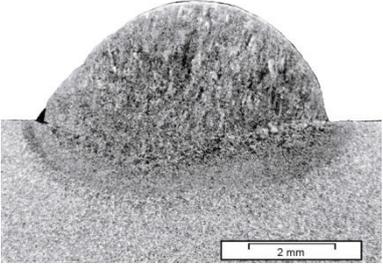
C ₁₄		Tensão (V)		Corrente (A)		Velocidade de Soldagem (cm/min)
		T_M	T_E	C_M	C_E	
		21,6	130	20,55	149,5	31,5
		Altura (mm)		Largura Cordão (mm)		Penetração Cordão (mm)
		3,188		6,755		1,414
		Taxa de diluição (%)		Largura ZTA (mm)		Penetração ZTA (mm)
		15,938		0,473		0,345

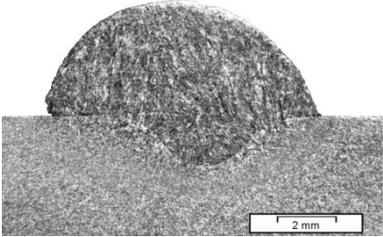
C ₁₅		Tensão (V)		Corrente (A)		Velocidade de Soldagem (cm/min)
		T_M	T_E	C_M	C_E	
		21,6	130	20,55	149,5	31,5
		Altura (mm)		Largura Cordão (mm)		Penetração Cordão (mm)
		3,581		6,196		1,352
		Taxa de diluição (%)		Largura ZTA (mm)		Penetração ZTA (mm)
		14,998		0,491		0,394

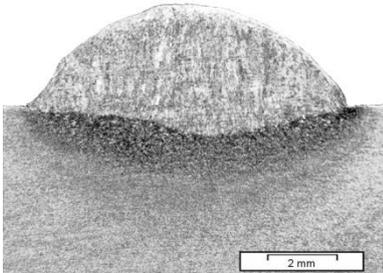
Processo Duplo Arame (DW)						
Arame 2 – 1,0mm (Mestre) + Arame 1 – 0,8mm (Escravo)						
Nº CP	Imagem	Parâmetros Geométricos				
65		Tensão (V)		Corrente (A)		Velocidade de Soldagem (cm/min)
		T_M	T_E	C_M	C_E	
		18,7	127	24,0	148	28
		Altura (mm)		Largura Cordão (mm)		Penetração Cordão (mm)
		3,346		10,464		1,080
		Taxa de diluição (%)		Largura ZTA (mm)		Penetração ZTA (mm)
		16,733		0,189		0,390

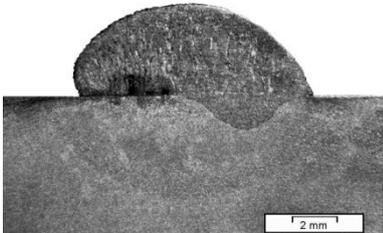
66		Tensão (V)		Corrente (A)		Velocidade de Soldagem (cm/min)
		T_M	T_E	C_M	C_E	
		22,4	172	24,0	112	35
		Altura (mm)		Largura Cordão (mm)		Penetração Cordão (mm)
		2,801		10,069		1,451
		Taxa de diluição (%)		Largura ZTA (mm)		Penetração ZTA (mm)
		20,157		0,203		0,467

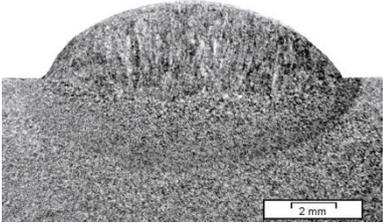
67		Tensão (V)		Corrente (A)		Velocidade de Soldagem (cm/min)
		T_M	T_E	C_M	C_E	
		22,4	172	19,2	112	35
		Altura (mm)		Largura Cordão (mm)		Penetração Cordão (mm)
		3,216		6,923		1,084
		Taxa de diluição (%)		Largura ZTA (mm)		Penetração ZTA (mm)
		22,508		0,340		0,378

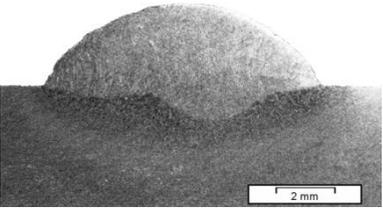
68		Tensão (V)		Corrente (A)		Velocidade de Soldagem (cm/min)
		T_M	T_E	C_M	C_E	
		18,7	127	19,2	112	35
		Altura (mm)		Largura Cordão (mm)		Penetração Cordão (mm)
		2,808		6,796		1,083
		Taxa de diluição (%)		Largura ZTA (mm)		Penetração ZTA (mm)
		16,452		0,346		0,283

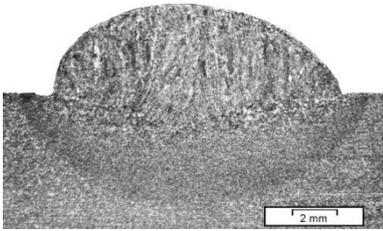
69		Tensão (V)		Corrente (A)		Velocidade de Soldagem (cm/min)
		T_M	T_E	C_M	C_E	
		18,7	172	19,2	112	28
		Altura (mm)		Largura Cordão (mm)		Penetração Cordão (mm)
		4,019		9,206		1,675
		Taxa de diluição (%)		Largura ZTA (mm)		Penetração ZTA (mm)
		14,230		0,391		0,365

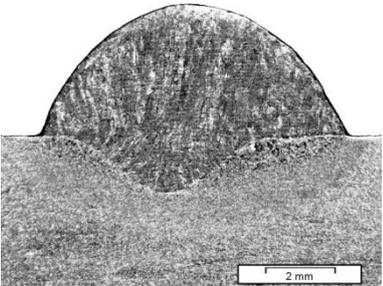
70		Tensão (V)		Corrente (A)		Velocidade de Soldagem (cm/min)
		T_M	T_E	C_M	C_E	
		22,4	127	24,0	112	35
		Altura (mm)		Largura Cordão (mm)		Penetração Cordão (mm)
		2,958		9,262		0,886
		Taxa de diluição (%)		Largura ZTA (mm)		Penetração ZTA (mm)
		15,487		0,490		1,115

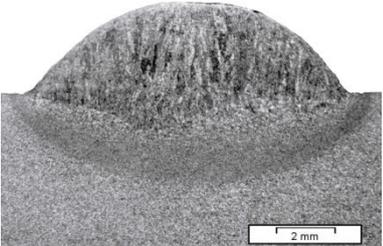
71		Tensão (V)		Corrente (A)		Velocidade de Soldagem (cm/min)
		T_M	T_E	C_M	C_E	
		18,7	172	19,2	148	28
		Altura (mm)		Largura Cordão (mm)		Penetração Cordão (mm)
		4,172		10,491		1,519
		Taxa de diluição (%)		Largura ZTA (mm)		Penetração ZTA (mm)
		10,631		0,385		0,312

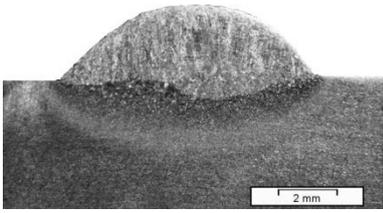
72		Tensão (V)		Corrente (A)		Velocidade de Soldagem (cm/min)
		T_M	T_E	C_M	C_E	
		22,4	127	24,0	148	28
		Altura (mm)		Largura Cordão (mm)		Penetração Cordão (mm)
		3,492		13,463		1,120
		Taxa de diluição (%)		Largura ZTA (mm)		Penetração ZTA (mm)
		15,348		0,580		0,906

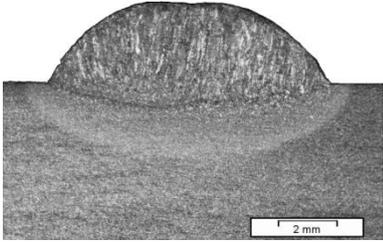
73		Tensão (V)		Corrente (A)		Velocidade de Soldagem (cm/min)
		T_M	T_E	C_M	C_E	
		18,7	127	24,0	112	28
		Altura (mm)		Largura Cordão (mm)		Penetração Cordão (mm)
		2,832		9,541		1,309
		Taxa de diluição (%)		Largura ZTA (mm)		Penetração ZTA (mm)
		17,666		0,594		0,442

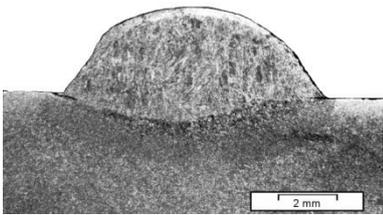
74		Tensão (V)		Corrente (A)		Velocidade de Soldagem (cm/min)
		T_M	T_E	C_M	C_E	
		22,4	172	24,0	148	28
		Altura (mm)		Largura Cordão (mm)		Penetração Cordão (mm)
		4,039		12,903		1,573
		Taxa de diluição (%)		Largura ZTA (mm)		Penetração ZTA (mm)
		15,382		0,802		0,706

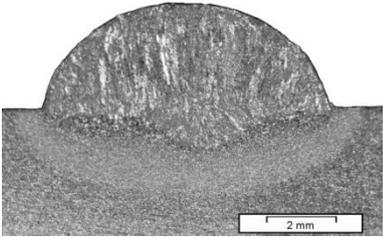
75		Tensão (V)		Corrente (A)		Velocidade de Soldagem (cm/min)
		T_M	T_E	C_M	C_E	
		18,7	172	24,0	148	28
		Altura (mm)		Largura Cordão (mm)		Penetração Cordão (mm)
		3,836		8,806		1,634
		Taxa de diluição (%)		Largura ZTA (mm)		Penetração ZTA (mm)
		15,088		0,556		0,439

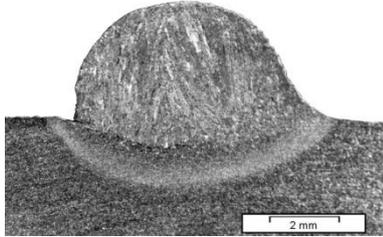
76		Tensão (V)		Corrente (A)		Velocidade de Soldagem (cm/min)
		T_M	T_E	C_M	C_E	
		22,4	172	24,0	148	35
		Altura (mm)		Largura Cordão (mm)		Penetração Cordão (mm)
		3,136		11,134		1,319
		Taxa de diluição (%)		Largura ZTA (mm)		Penetração ZTA (mm)
		16,868		0,498		0,710

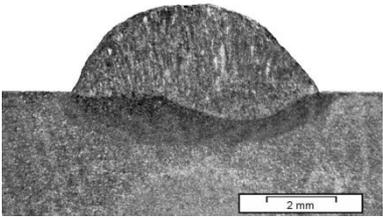
77		Tensão (V)		Corrente (A)		Velocidade de Soldagem (cm/min)
		T_M	T_E	C_M	C_E	
		18,7	127	24,0	112	35
		Altura (mm)		Largura Cordão (mm)		Penetração Cordão (mm)
		2,527		8,749		0,731
		Taxa de diluição (%)		Largura ZTA (mm)		Penetração ZTA (mm)
		13,600		0,500		0,720

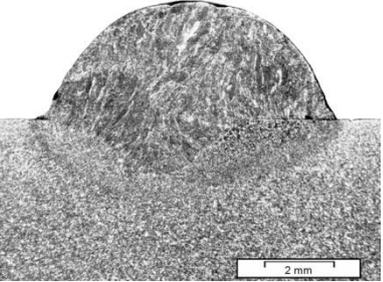
78		Tensão (V)		Corrente (A)		Velocidade de Soldagem (cm/min)
		T_M	T_E	C_M	C_E	
		22,4	127	24,0	148	35
		Altura (mm)		Largura Cordão (mm)		Penetração Cordão (mm)
		2,791		9,683		0,914
		Taxa de diluição (%)		Largura ZTA (mm)		Penetração ZTA (mm)
		17,832		0,401		0,487

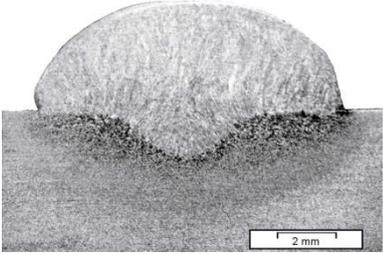
79		Tensão (V)		Corrente (A)		Velocidade de Soldagem (cm/min)
		T_M	T_E	C_M	C_E	
		22,4	127	19,2	112	28
		Altura (mm)		Largura Cordão (mm)		Penetração Cordão (mm)
		3,045		9,348		0,964
		Taxa de diluição (%)		Largura ZTA (mm)		Penetração ZTA (mm)
		15,522		0,426		0,741

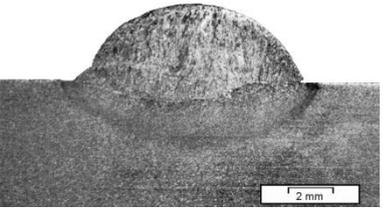
80		Tensão (V)		Corrente (A)		Velocidade de Soldagem (cm/min)
		T_M	T_E	C_M	C_E	
		18,7	172	24,0	148	35
		Altura (mm)		Largura Cordão (mm)		Penetração Cordão (mm)
		3,087		8,505		1,204
		Taxa de diluição (%)		Largura ZTA (mm)		Penetração ZTA (mm)
		15,539		0,508		0,5330,

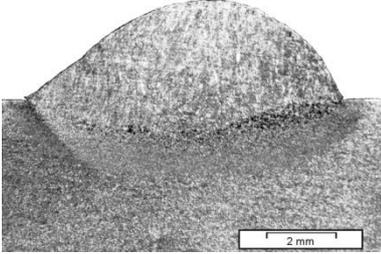
81		Tensão (V)		Corrente (A)		Velocidade de Soldagem (cm/min)
		T_M	T_E	C_M	C_E	
		22,4	127	19,2	148	35
		Altura (mm)		Largura Cordão (mm)		Penetração Cordão (mm)
		3,397		7,336		0,903
		Taxa de diluição (%)		Largura ZTA (mm)		Penetração ZTA (mm)
		15,930		0,542		0,542

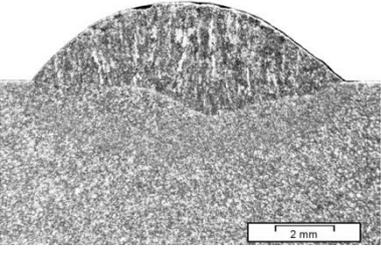
82		Tensão (V)		Corrente (A)		Velocidade de Soldagem (cm/min)
		T_M	T_E	C_M	C_E	
		18,7	127	24,0	148	35
		Altura (mm)		Largura Cordão (mm)		Penetração Cordão (mm)
		2,571		7,155		0,834
		Taxa de diluição (%)		Largura ZTA (mm)		Penetração ZTA (mm)
		14,558		0,541		0,563

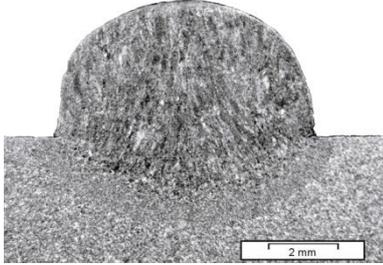
83		Tensão (V)		Corrente (A)		Velocidade de Soldagem (cm/min)
		T_M	T_E	C_M	C_E	
		18,7	172	19,2	112	35
		Altura (mm)		Largura Cordão (mm)		Penetração Cordão (mm)
		3,474		8,695		1,617
		Taxa de diluição (%)		Largura ZTA (mm)		Penetração ZTA (mm)
		15,314		0,550		0,522

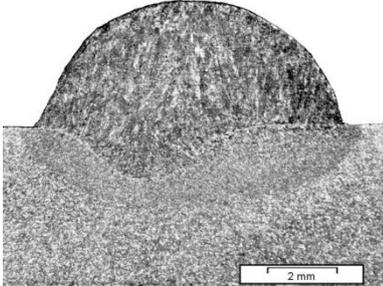
84		Tensão (V)		Corrente (A)		Velocidade de Soldagem (cm/min)
		T_M	T_E	C_M	C_E	
		18,7	172	24,0	112	28
		Altura (mm)		Largura Cordão (mm)	Penetração Cordão (mm)	
		3,766		10,475	1,746	
		Taxa de diluição (%)		Largura ZTA (mm)	Penetração ZTA (mm)	
		13,499		0,472	0,497	

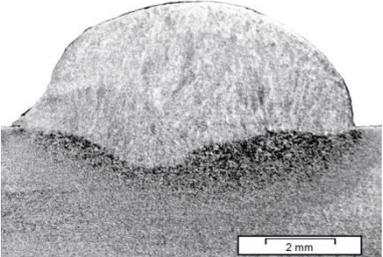
85		Tensão (V)		Corrente (A)		Velocidade de Soldagem (cm/min)
		T_M	T_E	C_M	C_E	
		22,4	127	19,2	148	28
		Altura (mm)		Largura Cordão (mm)	Penetração Cordão (mm)	
		3,519		10,291	1,093	
		Taxa de diluição (%)		Largura ZTA (mm)	Penetração ZTA (mm)	
		17,192		0,400	0,533	

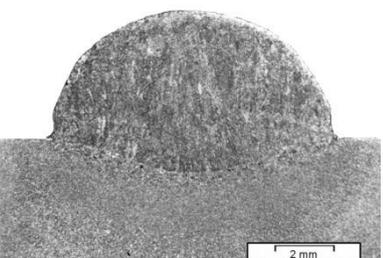
86		Tensão (V)		Corrente (A)		Velocidade de Soldagem (cm/min)
		T_M	T_E	C_M	C_E	
		22,4	127	19,2	112	35
		Altura (mm)		Largura Cordão (mm)		Penetração Cordão (mm)
		2,881		9,125		0,955
		Taxa de diluição (%)		Largura ZTA (mm)		Penetração ZTA (mm)
		16,793		0,388		0,413

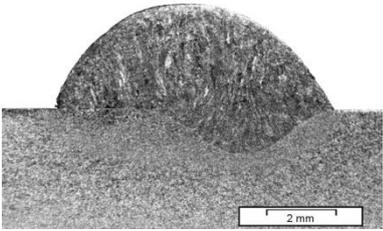
87		Tensão (V)		Corrente (A)		Velocidade de Soldagem (cm/min)
		T_M	T_E	C_M	C_E	
		22,4	127	24,0	112	28
		Altura (mm)		Largura Cordão (mm)		Penetração Cordão (mm)
		2,710		10,597		1,238
		Taxa de diluição (%)		Largura ZTA (mm)		Penetração ZTA (mm)
		18,255		0,411		0,502

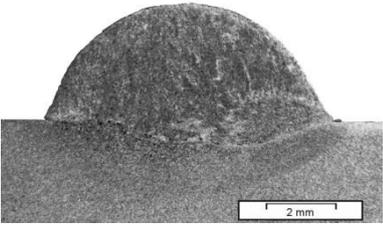
88		Tensão (V)		Corrente (A)		Velocidade de Soldagem (cm/min)
		T_M	T_E	C_M	C_E	
		22,4	172	19,2	112	28
		Altura (mm)		Largura Cordão (mm)		Penetração Cordão (mm)
		3,973		7,628		1,479
		Taxa de diluição (%)		Largura ZTA (mm)		Penetração ZTA (mm)
		17,257		0,455		0,496

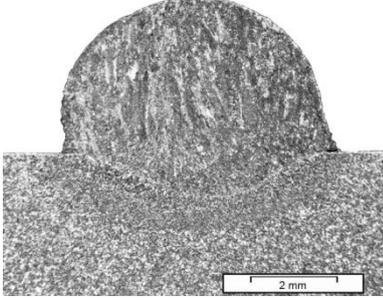
89		Tensão (V)		Corrente (A)		Velocidade de Soldagem (cm/min)
		T_M	T_E	C_M	C_E	
		18,7	172	19,2	148	35
		Altura (mm)		Largura Cordão (mm)		Penetração Cordão (mm)
		3,672		8,953		1,514
		Taxa de diluição (%)		Largura ZTA (mm)		Penetração ZTA (mm)
		13,841		0,508		0,516

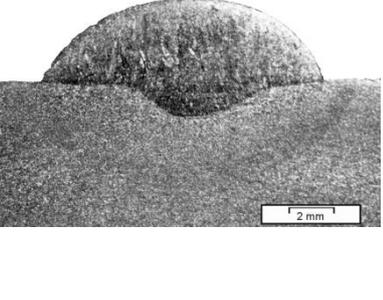
90		Tensão (V)		Corrente (A)		Velocidade de Soldagem (cm/min)
		T_M	T_E	C_M	C_E	
		18,7	127	19,2	112	28
		Altura (mm)		Largura Cordão (mm)		Penetração Cordão (mm)
		3,646		9,950		1,256
		Taxa de diluição (%)		Largura ZTA (mm)		Penetração ZTA (mm)
		13,913		0,359		0,481

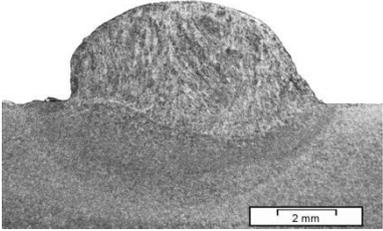
91		Tensão (V)		Corrente (A)		Velocidade de Soldagem (cm/min)
		T_M	T_E	C_M	C_E	
		22,4	172	19,2	148	28
		Altura (mm)		Largura Cordão (mm)		Penetração Cordão (mm)
		4,405		9,927		1,177
		Taxa de diluição (%)		Largura ZTA (mm)		Penetração ZTA (mm)
		13,606		0,379		0,449

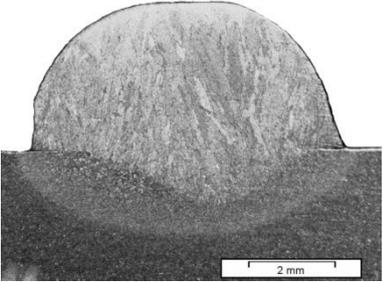
92		Tensão (V)		Corrente (A)		Velocidade de Soldagem (cm/min)
		T_M	T_E	C_M	C_E	
		18,7	172	24,0	112	35
		Altura (mm)		Largura Cordão (mm)		Penetração Cordão (mm)
		3,053		8,007		1,299
		Taxa de diluição (%)		Largura ZTA (mm)		Penetração ZTA (mm)
		14,428		0,410		0,455

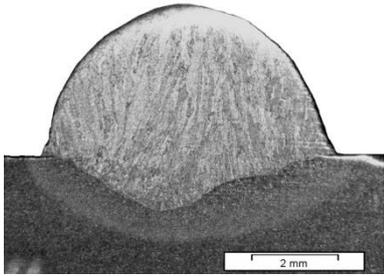
93		Tensão (V)		Corrente (A)		Velocidade de Soldagem (cm/min)
		T_M	T_E	C_M	C_E	
		18,7	127	19,2	148	35
		Altura (mm)		Largura Cordão (mm)		Penetração Cordão (mm)
		3,397		8,299		0,748
		Taxa de diluição (%)		Largura ZTA (mm)		Penetração ZTA (mm)
		12,034		0,376		0,402

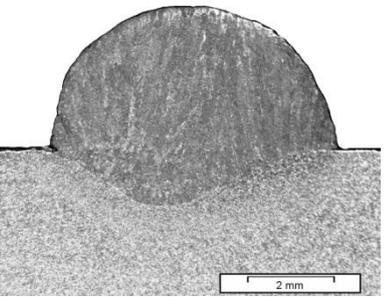
94		Tensão (V)		Corrente (A)		Velocidade de Soldagem (cm/min)
		T_M	T_E	C_M	C_E	
		18,7	127	19,2	148	28
		Altura (mm)		Largura Cordão (mm)		Penetração Cordão (mm)
		3,657		6,486		1,049
		Taxa de diluição (%)		Largura ZTA (mm)		Penetração ZTA (mm)
		13,152		0,403		0,408

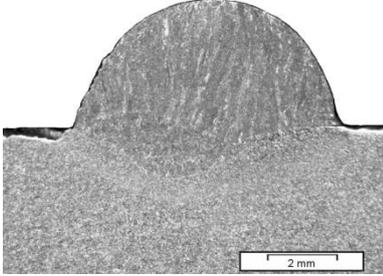
95		Tensão (V)		Corrente (A)		Velocidade de Soldagem (cm/min)
		T_M	T_E	C_M	C_E	
		22,4	172	24,0	112	28
		Altura (mm)		Largura Cordão (mm)		Penetração Cordão (mm)
		3,679		12,624		1,653
		Taxa de diluição (%)		Largura ZTA (mm)		Penetração ZTA (mm)
		15,771		0,451		0,462

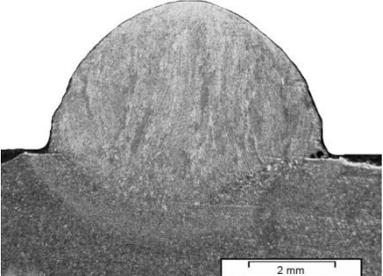
96		Tensão (V)		Corrente (A)		Velocidade de Soldagem (cm/min)
		T_M	T_E	C_M	C_E	
		22,4	172	19,2	148	35
		Altura (mm)		Largura Cordão (mm)		Penetração Cordão (mm)
		3,512		8,587		1,147
		Taxa de diluição (%)		Largura ZTA (mm)		Penetração ZTA (mm)
		15,910		0,400		0,411

C ₁₆		Tensão (V)		Corrente (A)		Velocidade de Soldagem (cm/min)
		T_M	T_E	C_M	C_E	
		20,55	149,5	21,6	130	31,5
		Altura (mm)		Largura Cordão (mm)		Penetração Cordão (mm)
		3,491		7,204		1,263
		Taxa de diluição (%)		Largura ZTA (mm)		Penetração ZTA (mm)
		13,333		0,383		0,393

C ₁₇		Tensão (V)		Corrente (A)		Velocidade de Soldagem (cm/min)
		T_M	T_E	C_M	C_E	
		20,55	149,5	21,6	130	31,5
		Altura (mm)		Largura Cordão (mm)		Penetração Cordão (mm)
		3,595		6,879		1,270
		Taxa de diluição (%)		Largura ZTA (mm)		Penetração ZTA (mm)
		15,187		0,391		0,355

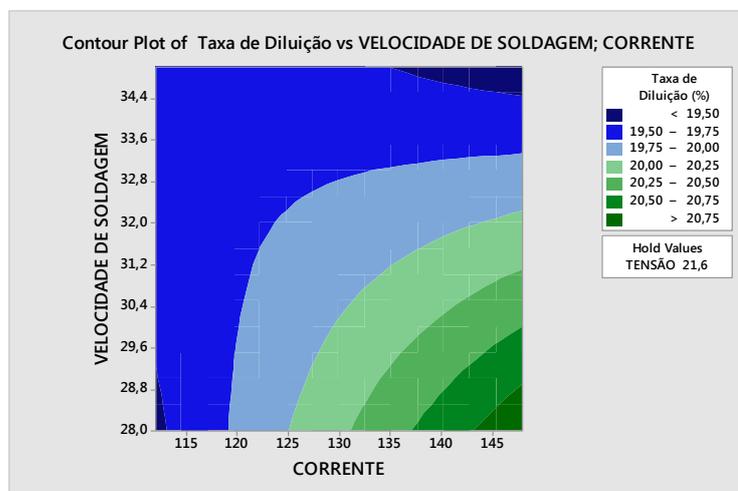
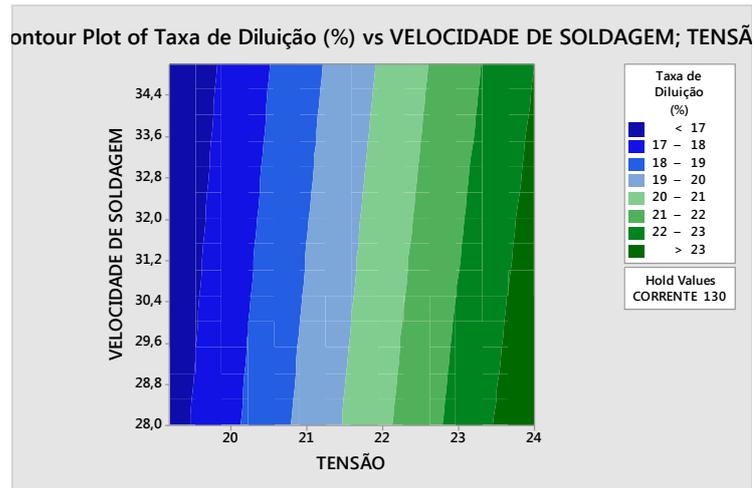
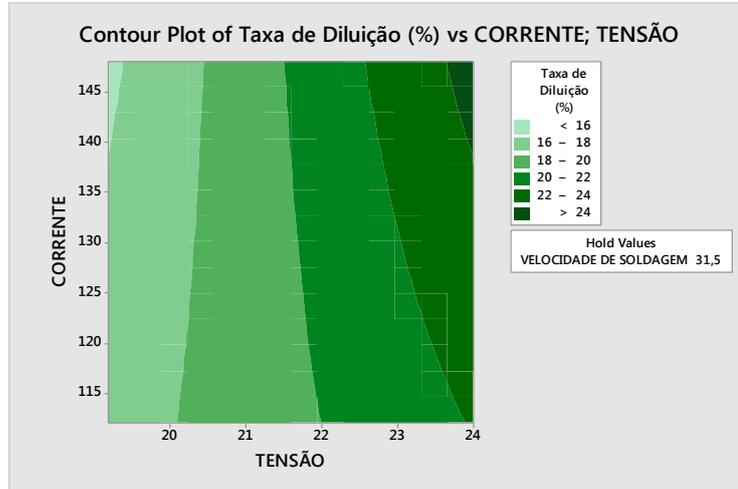
C ₁₈		Tensão (V)		Corrente (A)		Velocidade de Soldagem (cm/min)
		T_M	T_E	C_M	C_E	
		20,55	149,5	21,6	130	31,5
		Altura (mm)		Largura Cordão (mm)		Penetração Cordão (mm)
		3,340		6,638		1,318
		Taxa de diluição (%)		Largura ZTA (mm)		Penetração ZTA (mm)
		16,631		0,360		0,375

C ₁₉		Tensão (V)		Corrente (A)		Velocidade de Soldagem (cm/min)
		T_M	T_E	C_M	C_E	
		20,55	149,5	21,6	130	31,5
		Altura (mm)		Largura Cordão (mm)		Penetração Cordão (mm)
		3,741		7,766		1,522
		Taxa de diluição (%)		Largura ZTA (mm)		Penetração ZTA (mm)
		16,091		0,310		0,326

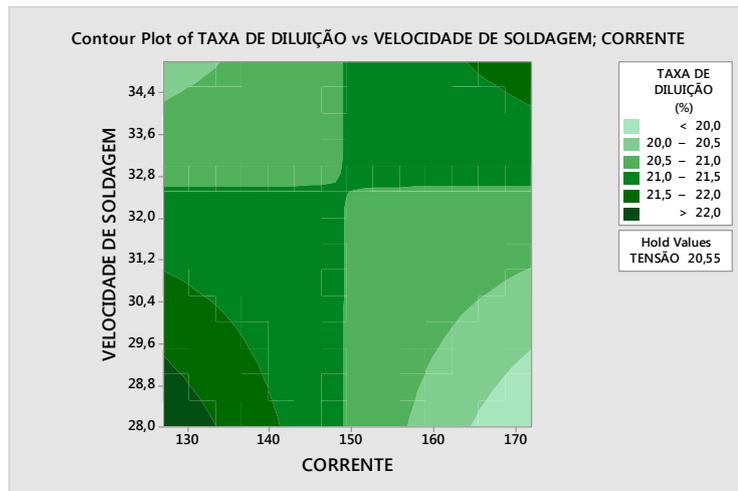
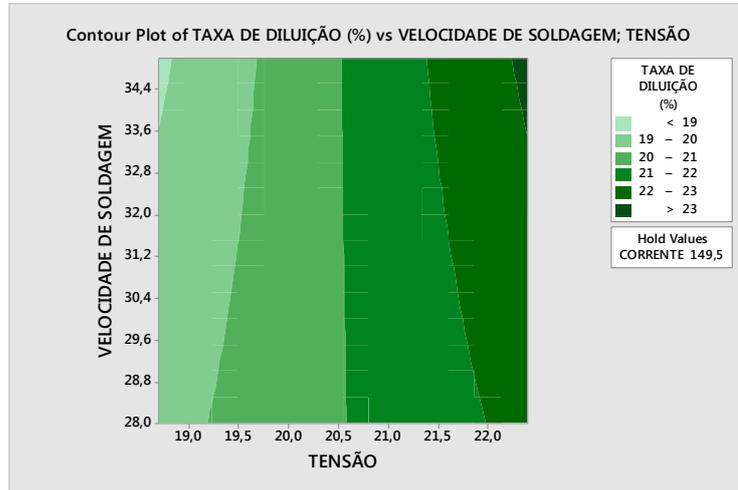
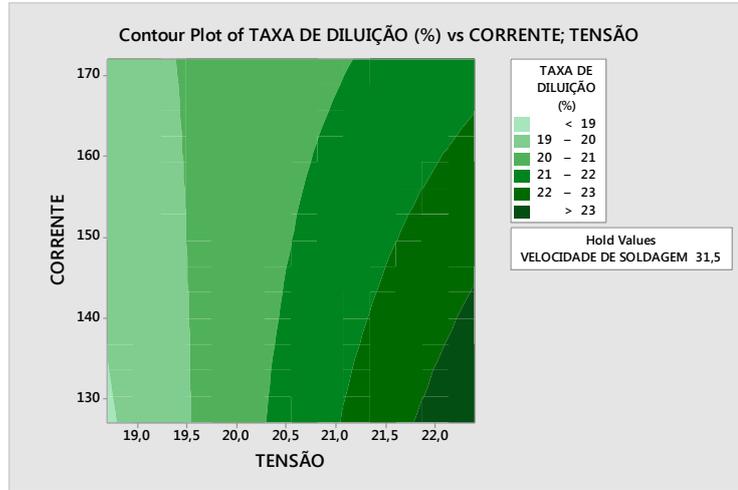
C ₂₀		Tensão (V)		Corrente (A)		Velocidade de Soldagem (cm/min)
		T_M	T_E	C_M	C_E	
		20,55	149,5	21,6	130	31,5
		Altura (mm)		Largura Cordão (mm)		Penetração Cordão (mm)
		3,554		6,500		1,366
		Taxa de diluição (%)		Largura ZTA (mm)		Penetração ZTA (mm)
		16,690		0,321		0,334

APÊNDICE D - Gráficos de contorno para Taxa de diluição x Parâmetros de soldagem

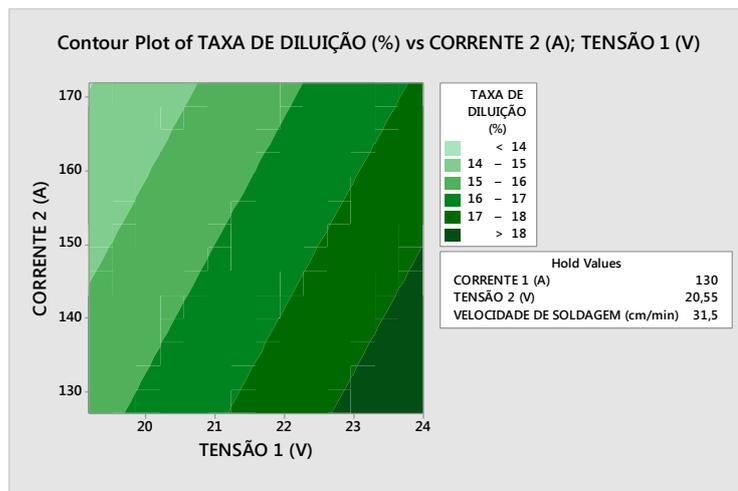
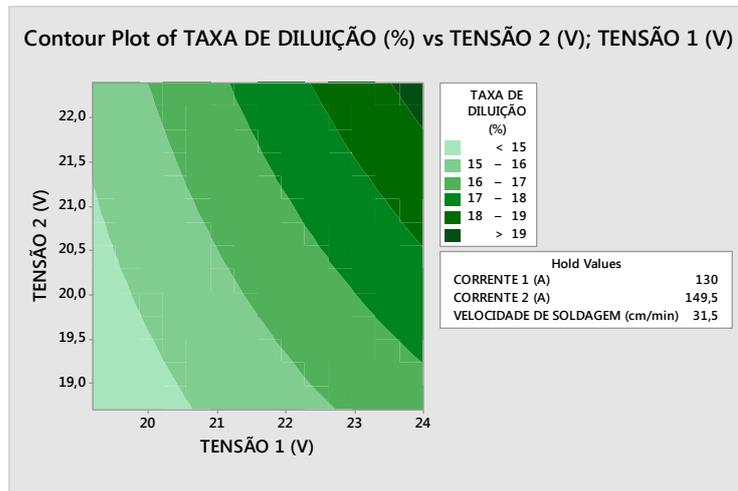
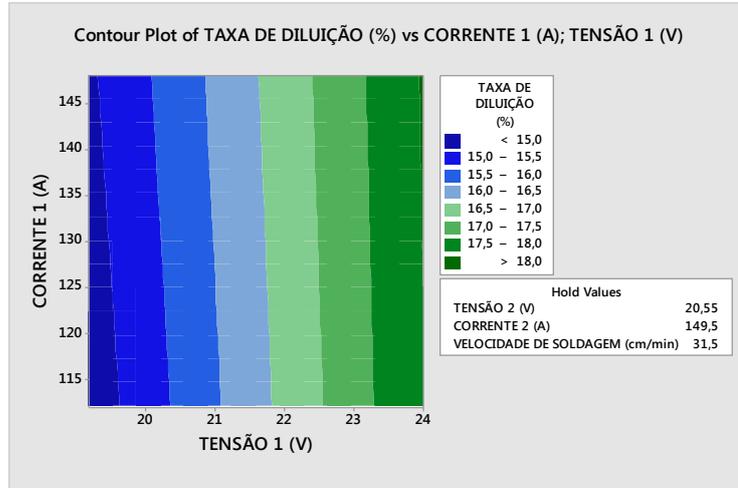
1) Arame 0,8mm (Mestre) + Arame 1,0mm (Escravo)

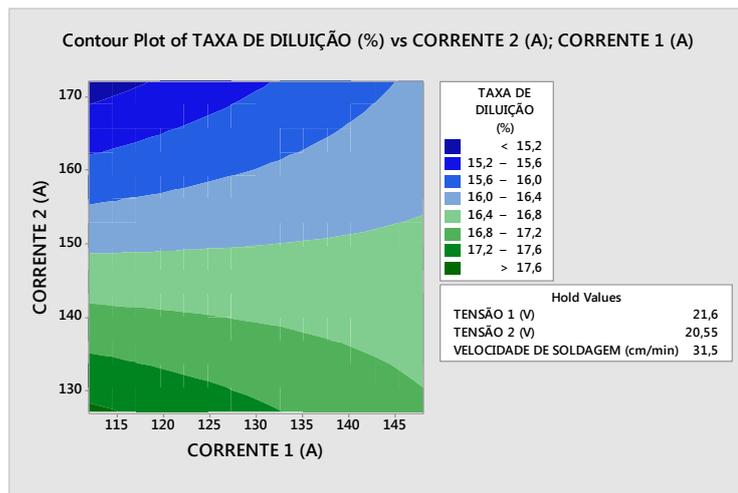
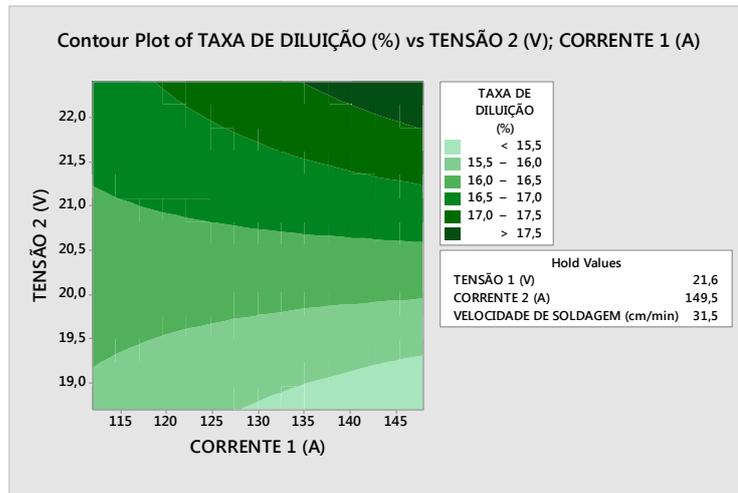
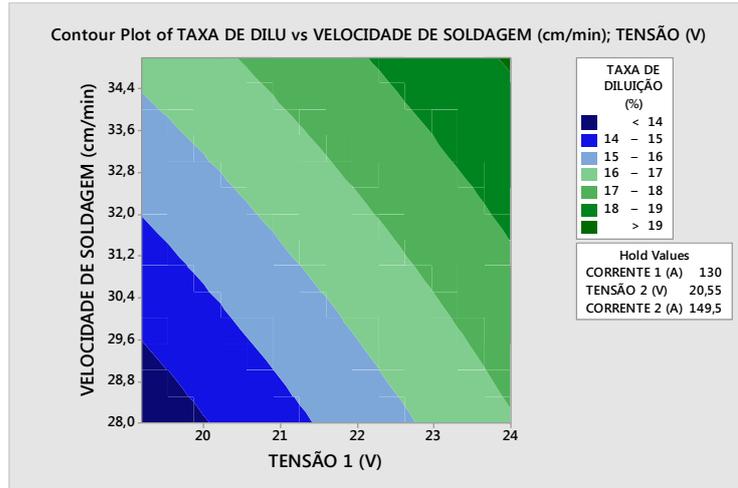


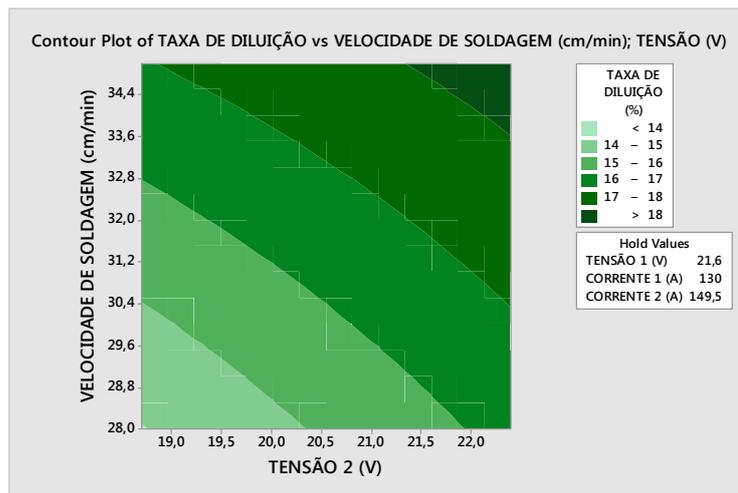
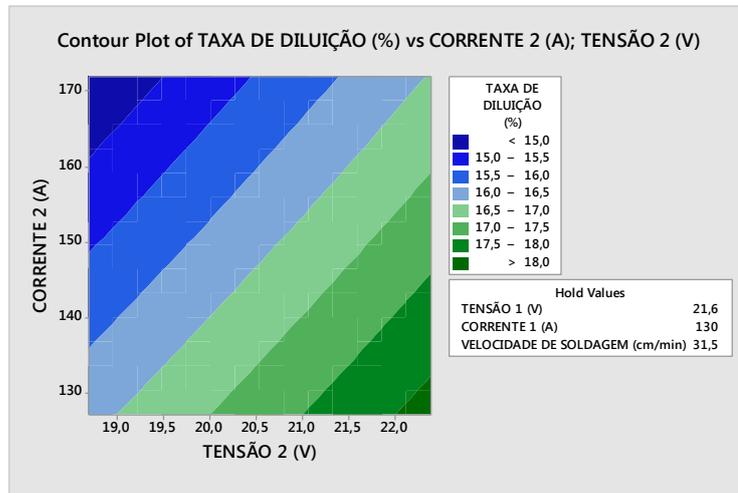
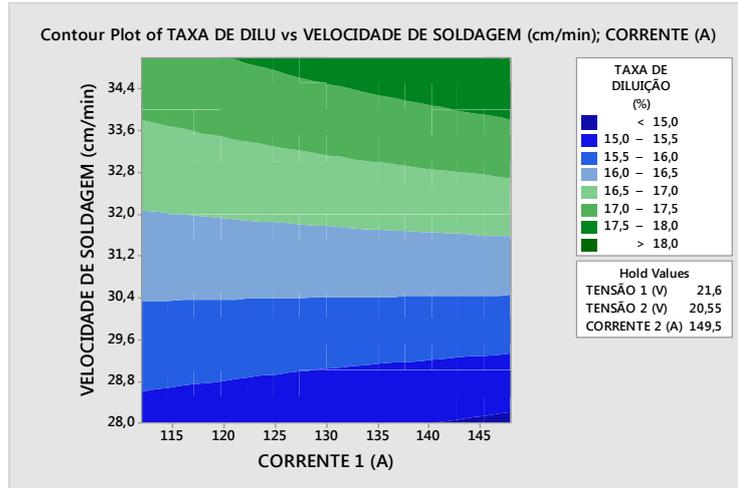
2) Arame 1,0mm (Mestre) + Arame 1,0mm (Escravo)

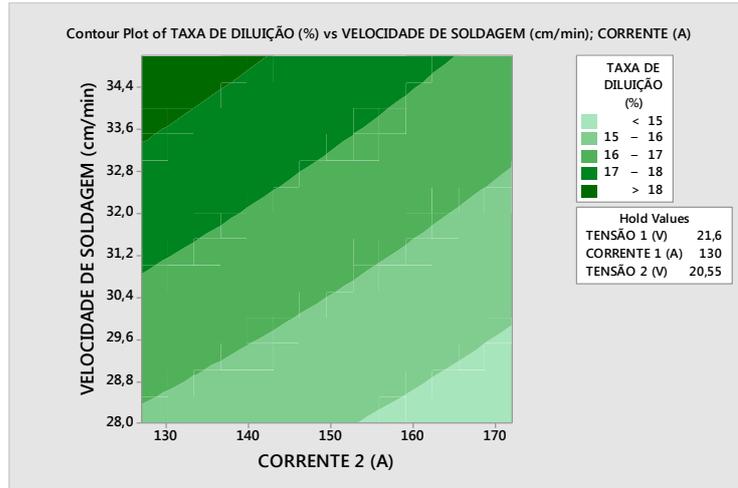


3) Arame 0,8mm (Mestre) + Arame 1,0mm (Escravo)









4) Arame 1,0mm (Mestre) + Arame 0,8mm (Escravo)

