

**UNIVERSIDADE FEDERAL DO CEARÁ
CENTRO DE TECNOLOGIA
DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA MECÂNICA E PRODUÇÃO
PROGRAMA DE MESTRADO EM ENGENHARIA E CIÊNCIA DE MATERIAIS**

**EFEITO DO TIPO DE GÁS DE PROTEÇÃO SOBRE O DESEMPENHO DO ARAME
TUBULAR AWS E71T-1, UTILIZANDO PROCESSO CONVENCIONAL E PULSADO**

JUSCELINO CHAVES SALES

**Fortaleza-CE
Dezembro de 2002**



**UNIVERSIDADE FEDERAL DO CEARÁ
CENTRO DE TECNOLOGIA
DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA MECÂNICA E PRODUÇÃO
MESTRADO EM ENGENHARIA E CIÊNCIA DE MATERIAIS**

**EFEITO DO TIPO DE GÁS DE PROTEÇÃO SOBRE O DESEMPENHO DO ARAME
TUBULAR AWS E71T-1, UTILIZANDO PROCESSO CONVENCIONAL E PULSADO**

Juscelino Chaves Sales

Dissertação apresentada ao Departamento de Engenharia Mecânica e Produção da Universidade Federal do Ceará como parte dos requisitos para obtenção do título de Mestre em Engenharia e Ciência de Materiais.

Orientador: Prof. Dr. Jesualdo Pereira Farias

**Fortaleza-CE
Dezembro de 2002**



**UNIVERSIDADE FEDERAL DO CEARÁ
CENTRO DE TECNOLOGIA
DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA MECÂNICA E PRODUÇÃO
MESTRADO EM ENGENHARIA E CIÊNCIA DE MATERIAIS**

PARECER DA COMISSÃO DE DISSERTAÇÃO

JUSCELINO CHAVES SALES

**EFEITO DO TIPO DE GÁS DE PROTEÇÃO SOBRE O DESEMPENHO DO ARAME
TUBULAR AWS E71T-1, UTILIZANDO PROCESSO CONVENCIONAL E PULSADO**

A Comissão de Dissertação composta pelos professores Jesualdo Pereira Farias (Presidente e Orientador), Hélio Cordeiro de Miranda do Departamento de Engenharia Mecânica e Produção e Carlos Alberto Mendes da Mota do Departamento de Engenharia Mecânica da Universidade Federal do Pará, consideram o candidato:

() Aprovado com Louvor () Aprovado () Não Aprovado

Secretaria do Curso de Mestrado em Engenharia e Ciência de Materiais da Universidade Federal do Ceará, em 16 de dezembro de 2002.

Prof. Dr. Jesualdo Pereira Farias
Presidente e Orientador

Prof. Dr. Hélio Cordeiro de Miranda
Membro

Prof. Dr. Carlos Alberto Mendes da Mota
Membro

A Deus
À Santíssima Virgem Maria
Aos meus pais Jeová e Temis
À minha esposa Inês
Aos meus filhos Jeová Neto e Joana
Maria
Aos meus irmãos Jane, Jeová Filho,
Temis Eucaria, Roberto e Paulo.

AGRADECIMENTOS

Ao professor e orientador Dr. Jesualdo Pereira Farias, pela amizade, orientação, apoio e incentivo para realização deste trabalho.

Ao professor Dr. Lindberg Lima Gonçalves pelo empenho na criação e coordenação do curso de Pós-graduação em Engenharia e Ciências de Materiais.

Ao professor Dr. Hamilton Ferreira Gomes de Abreu pela dedicação ao curso, pelos ensinamentos, e pelo incentivo e amizade para com os mestrandos.

Aos professores do curso de Pós-graduação em Engenharia e Ciência de Materiais da Universidade Federal do Ceará, pelos ensinamentos e incentivo e amizade durante o curso.

Aos colegas de turma, pela amizade e incentivo.

Ao Diretor geral do CENTEC, Prof. Dr. Francisco Oriar Fernandes

Ao CENTEC – UD – Sobral, nas pessoas da Professora Elda Fontenele Tahin e do Diretor Prof. Izairton Martins do Carmo.

Ao Eng. MSc. Temístocles de Souza Luz, pela amizade e sem o qual este trabalho não teria sido realizado.

Ao Eng. MSc. Carlos Eduardo Lima Rodrigues.

Aos bolsistas do ENGESOLDA-UFC, Belchior, Rodrigo e Edvan, pela contribuição a este trabalho.

Sales, J. C., 2002, "Efeito do Tipo de Gás de Proteção sobre o Desempenho do Arame Tubular AWS E71T-1, utilizando Processo Convencional e Pulsado", Dissertação de Mestrado, Universidade Federal do Ceará, CE.

Resumo

O arame tubular AWS E71T-1 tem sido utilizado, na grande maioria das aplicações, com CO₂ puro como gás de proteção. Um estudo recente demonstrou que é possível melhorar as características metalúrgicas do metal de solda deste eletrodo empregando-se uma mistura de CO₂ e argônio. No entanto, para esta mistura de gás, as informações não foram levantadas, de forma suficiente, com relação ao desempenho operacional do arame. Sabe-se que o tipo de gás afeta também a transferência metálica, o comportamento do arco, a geometria do cordão de solda, a taxa de deposição e a eficiência de fusão do arame, dentre outras características do processo de soldagem. O objetivo do trabalho consiste em realizar um levantamento das características operacionais do arame tubular AWS E71T-1 empregando CO₂ puro e uma mistura de CO₂ + Argônio na soldagem convencional em tensão constante e na soldagem com corrente pulsada. Neste sentido, foram realizadas soldas, com arame tubular AWS E71T-1 de 1,2 mm de diâmetro, em simples deposição, na posição plana, em corpos de prova de aço ABNT 1020 com dimensões de 150x50x8 mm. Empregou-se uma fonte eletrônica de soldagem e um sistema automático de posicionamento da pistola. A tensão de soldagem foi mantida em 23 V. A relação entre a velocidade de alimentação do arame e a velocidade de soldagem foi mantida entre 20 e 23, para garantir uma área adicionada aproximadamente constante de 18 mm². Analisaram-se os efeitos do tipo de gás de proteção (CO₂ e Ar + CO₂), da distância bico de contato peça (20 e 25 mm), dos níveis de corrente (160, 180 e 200 A) e sua natureza (convencional e pulsada) sobre o comportamento do arco, sobre a geometria da solda e sobre as características econômicas do arame (taxa de fusão, taxa de deposição e eficiência de deposição). Os resultados indicam que o tipo de gás de proteção afeta mais significativamente a transferência metálica e a geometria da solda, exercendo pequena influência sobre as características econômicas do arame. Constatou-se também que o efeito da intensidade de corrente sobre a operacionalidade do arame tubular AWS E71T-1 depende sensivelmente do tipo de corrente (convencional ou pulsada).

Palavras-chave: gás de proteção, características operacionais, características econômicas e geométricas.

Sales, J. C., 2002, "The effect of the shielding gas type on performance of the AWS E71T-1 flux cored wire using the conventional and the pulsed process", M. Sc. Thesis Universidade Federal do Ceará, Fortaleza-CE.

Abstract

The flux cored wire AWS E71T-1 has been used in the vast majority of its applications with pure CO₂ as a shielding gas. A recent study demonstrated that it is possible to improve the metallurgical characteristics of the weld metal of the flux cored wire by the application of a mixture of CO₂ and argon. However, information for this gas mixture hasn't been raised sufficiently concerning the operational performance of the wire using this gas mixture. It is known that the gas type also affects the metal transfer, the behavior of arc welding, the weld bead geometry, the deposition rate and the deposition efficiency of the wire within other characteristics of the welding process. The aim of the study consists in the realization of a survey of the AWS E71T-1 flux cored wire operational characteristics (economic characteristics of the welding consumable, geometric weld characteristics, arc stability and metal transfer). Due to this, bead on plate welding was performed using the flux cored wire AWS E71T-1 with a diameter of 1,2 mm, in flat position on samples of ABNT 1020 steel with a size of 150x50x8 mm. An electronic welding source and a positioning system were used. It was sustained a welding tension of 23 V. The relationship between the wire feed speed and the travel speed was kept constant between 20 and 23 to guarantee a deposit area of approximately 18 mm². The influence of shielding gas (CO₂ and Ar and CO₂), the contact tube-to-work (TTW) (20 and 25 mm), the welding current (160, 180 and 200 A) and its nature (conventional and pulsed) were analyzed regarding the behavior of arc welding, the weld geometry and the economic characteristics of cored wire (fusion rate, deposition rate and deposition efficiency). The results showed that the shielding gas type has more influence on metal transfer and welding geometry and little influence on economic characteristics of the cored wire. It was also shown that the effect of the current intensity on the operationally of the flux cored wire AWS E71T-1 depends perceptibly on the current type (conventional or pulsed).

Key words: shielding gas, operational characteristics, economic and geometric characteristics.

SUMÁRIO

SUMÁRIO	8
ÍNDICE DE FIGURAS	10
ÍNDICE DE TABELAS	11
CAPÍTULO I	12
1 INTRODUÇÃO	12
CAPÍTULO II	14
2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA	14
2.1 CARACTERIZAÇÃO DO PROCESSO	14
2.2 DESIGNAÇÃO DOS TIPOS DE ARAMES PARA SOLDAGEM COM PROTEÇÃO GASOSA	16
2.3 DESIGNAÇÃO DOS TIPOS DE ARAMES PARA SOLDAGEM SEM PROTEÇÃO GASOSA.....	18
2.3.1 <i>Arames tubulares de aço baixa liga</i>	19
2.4 TRANSFERÊNCIA METÁLICA.....	20
2.5 NATUREZA DA CORRENTE	28
2.5.1 <i>Corrente em regime convencional (fonte em tensão constante)</i>	28
2.5.2 <i>Corrente em regime convencional (fonte em corrente constante)</i>	28
2.5.3 <i>Corrente em regime pulsado</i>	28
2.6 AÇÃO DO FLUXO.....	31
2.7 AÇÃO DO GÁS	31
2.8 PROTEÇÃO PELA GERAÇÃO DE ESCÓRIA	33
2.9 CARACTERÍSTICAS METALÚRGICAS.....	34
2.10 ESTABILIDADE DO PROCESSO	36
2.11 CARACTERÍSTICAS ECONÔMICAS.....	38
2.12 PARÂMETROS DE SOLDAGEM	39
2.12.1 <i>DBCP</i>	39
2.12.2 <i>Tensão de soldagem</i>	41
2.12.3 <i>Corrente de soldagem</i>	41
2.12.4 <i>Velocidade de soldagem</i>	42
2.12.5 <i>Área adicionada</i>	42
CAPÍTULO III	44
3 MATERIAIS E MÉTODOS	44
3.1 EQUIPAMENTOS E MATERIAIS	44
3.1.1 <i>Fonte de soldagem</i>	44
3.1.2 <i>Tocha refrigerada a água</i>	44
3.1.3 <i>Posicionador eletrônico da tocha de soldagem</i>	46
3.1.4 <i>Sistema de alimentação de arame</i>	46
3.1.5 <i>Caixa de medição</i>	46
3.1.6 <i>Equipamentos para ensaios metalográficos</i>	46
3.1.7 <i>Sistema de aquisição de dados</i>	46
3.2 METODOLOGIA.....	48
3.2.1 <i>Alinhamento e nivelamento do suporte e do posicionador de soldagem</i>	49
3.2.2 <i>Parâmetros de soldagem</i>	49
3.2.3 <i>Critérios de avaliação</i>	51
CAPÍTULO IV	52
4 RESULTADOS E DISCUSSÃO	52
4.1 PRIMEIRA ETAPA (SOLDAGEM NO MODO TENSÃO CONSTANTE - CONVENCIONAL).....	52
4.1.1 <i>Estudo da estabilidade do arco</i>	52
4.1.2 <i>Estudo das características econômicas</i>	59
4.1.3 <i>Estudo das características geométricas</i>	63

	9
<hr/>	
4.2 SEGUNDA ETAPA (SOLDAGEM COM CORRENTE PULSADA)	66
4.2.1 <i>Estudo da estabilidade do arco</i>	67
4.2.2 <i>Estudo das características econômicas</i>	71
4.2.3 <i>Estudo das características geométricas</i>	73
CAPÍTULO V	76
5 CONCLUSÕES	76
CAPÍTULO VI	77
6 SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS	77
CAPÍTULO VII	78
7 BIBLIOGRAFIA	78

ÍNDICE DE FIGURAS

FIGURA 1 – ESQUEMA DA SOLDAGEM ARAME TUBULAR COM PROTEÇÃO GASOSA [10].	14
FIGURA 2 – GEOMETRIA DA SEÇÃO TRANSVERSAL DE ARAMES TUBULARES [2]. (A) SIMPLES, (B) E (C) MULTIFOLDER.	15
FIGURA 3 – IDENTIFICAÇÃO PARA ELETRODOS FCAW DE AÇO MÉDIO CARBONO [5].	16
FIGURA 4 – IDENTIFICAÇÃO PARA ELETRODOS FCAW DE AÇO BAIXA LIGA [5].	17
FIGURA 5 – TIPOS DE TRANSFERÊNCIA METÁLICA SEGUNDO IIW [15].	21
FIGURA 6 – TRANSFERÊNCIA POR CURTO-CIRCUITO [16].	23
FIGURA 7 – ESQUEMA DAS FORÇAS QUE AGEM NA TRANSFERÊNCIA METÁLICA NA SOLDAGEM A ARAME TUBULAR. EM (A), GOTA LIGADA FISICAMENTE À CASCA METÁLICA, EM (B), GOTA LIGADA SOMENTE À PROJEÇÃO DE ESCÓRIA [17].	24
FIGURA 8 – FOTOGRAFIA DA PONTA DE UM ARAME E71T-5. EM (A) VISTA GERAL DA PONTA (AUMENTO DE 19 X); EM (B) DETALHE MOSTRANDO A BOLHA DE GÁS E A ESCÓRIA LÍQUIDA ENVOLVENDO PARTE DA GOTA (AUMENTO DE 60 X) [17].	26
FIGURA 9 – DESENHO ESQUEMÁTICO DO EFEITO DO DIÂMETRO DO ARAME TUBULAR NA TRANSFERÊNCIA METÁLICA DO ARAME E71T-1 NA SOLDAGEM COM A MISTURA AR (75%) + CO ₂ (25%) [17].	27
FIGURA 10 – VARIÁVEIS DA CORRENTE PULSADA COM IMPOSIÇÃO DE CORRENTE [19].	29
FIGURA 11 – EFEITO DA CaF ₂ SOBRE A VISCOSIDADE DA ESCÓRIA [2].	34
FIGURA 12 – PARÂMETROS DE TRANSFERÊNCIA METÁLICA POR CURTO-CIRCUITO [15].	38
FIGURA 13 – EFEITO DA DBCP SOBRE O TEOR DE NITROGÊNIO [6].	40
FIGURA 14 – EFEITO DO APORTE TÉRMICO E DA DBCP SOBRE A DIFUSÃO DO HIDROGÊNIO NA SOLDA [24].	41
FIGURA 15 – EFEITO DA CORRENTE SOBRE A DIFUSÃO DO HIDROGÊNIO PARA UM ELETRODO E71T-1 [24].	42
FIGURA 16 – FONTE DE SOLDAGEM [10].	45
FIGURA 17 – PROCESSO OPERANDO COM TOCHA DE SOLDAGEM PARA ARAME TUBULAR [10].	45
FIGURA 18 – HISTOGRAMA DOS CURTOS-CIRCUITOS PARA O PROCESSO CONVENCIONAL COM AR E CO ₂ .	53
FIGURA 19 – HISTOGRAMA DOS CURTOS-CIRCUITOS PARA O PROCESSO CONVENCIONAL COM CO ₂ .	53
FIGURA 20 – OSCILOGRAMA PARA DBCP DE 20 MM, USANDO AR E CO ₂ .	54
FIGURA 21 – OSCILOGRAMA PARA DBCP DE 20 MM, USANDO CO ₂ .	54
FIGURA 22 – INFLUÊNCIA DO GÁS DE PROTEÇÃO SOBRE T _{cc} .	56
FIGURA 23 – INFLUÊNCIA DA DBCP SOBRE F _{cc} .	57
FIGURA 24 – INFLUÊNCIA DA DBCP SOBRE T _{cc} .	58
FIGURA 25 – INFLUÊNCIA DA CORRENTE DE SOLDAGEM SOBRE F _{cc} .	58
FIGURA 26 – RELAÇÃO ENTRE OS PARÂMETROS DE SOLDAGEM E F _{cc} .	58
FIGURA 27 – RELAÇÃO ENTRE OS PARÂMETROS DE SOLDAGEM E T _{cc} .	59
FIGURA 28 – INFLUÊNCIA DA DBCP SOBRE A TAXA DE FUSÃO.	61
FIGURA 29 – INFLUÊNCIA DA DBCP SOBRE A TAXA DE DEPOSIÇÃO.	61
FIGURA 30 – INFLUÊNCIA DA CORRENTE DE SOLDAGEM SOBRE TF.	62
FIGURA 31 – INFLUÊNCIA DA CORRENTE DE SOLDAGEM SOBRE TD.	62
FIGURA 32 – INFLUÊNCIA DA CORRENTE DE SOLDAGEM SOBRE ED.	63
FIGURA 33 – RELAÇÃO ENTRE OS PARÂMETROS DE SOLDAGEM E ED.	63
FIGURA 34 – ESQUEMA DE UMA SEÇÃO TRANSVERSAL DA SOLDA, COM SEUS PARÂMETROS GEOMÉTRICOS.	64
FIGURA 35 – EFEITO DOS FATORES SOBRE A LARGURA.	65
FIGURA 36 – EFEITO DOS FATORES SOBRE O REFORÇO.	65
FIGURA 37 – EFEITO DOS FATORES SOBRE A PENETRAÇÃO.	66
FIGURA 38 – HISTOGRAMA DOS CURTOS-CIRCUITOS PARA CORRENTE PULSADA COM CO ₂ .	68
FIGURA 39 – HISTOGRAMA DOS CURTOS-CIRCUITOS PARA CORRENTE PULSADA COM AR E CO ₂ .	68
FIGURA 40 – OSCILOGRAMA PARA DBCP DE 20 MM, USANDO AR + CO ₂ COM CORRENTE PULSADA.	69
FIGURA 41 – OSCILOGRAMA PARA DBCP DE 20 MM, USANDO CO ₂ , COM CORRENTE PULSADA.	69
FIGURA 42 – EFEITO DOS FATORES SOBRE F _{cc} .	70
FIGURA 43 – EFEITO DOS FATORES SOBRE T _{cc} .	70
FIGURA 44 – EFEITO DOS FATORES SOBRE TF.	72
FIGURA 45 – EFEITO DOS FATORES SOBRE TD.	72
FIGURA 46 – EFEITO DOS FATORES SOBRE ED.	73
FIGURA 47 – EFEITO DOS FATORES SOBRE A LARGURA.	74
FIGURA 48 – EFEITO DOS FATORES SOBRE O REFORÇO.	75
FIGURA 49 – EFEITO DOS FATORES SOBRE A PENETRAÇÃO.	75

ÍNDICE DE TABELAS

TABELA 1 – PROTEÇÃO E POLARIDADE REQUERIDAS PARA OS ARAMES TUBULARES PARA AÇOS DE MÉDIO CARBONO [5].....	17
TABELA 2 – RESOLUÇÃO DA PLACA DE AQUISIÇÃO INTERDATA II.....	47
TABELA 3 – PARÂMETROS DE SOLDAGEM NO PROCESSO CONVENCIONAL.....	50
TABELA 4 – PARÂMETROS DE SOLDAGEM NO PROCESSO PULSADO.....	50
TABELA 5 – VALORES DE PULSO E DE BASE PARA CORRENTE E TEMPO (PROCESSO PULSADO).....	50
TABELA 6 – PARÂMETROS DE SOLDAGEM PARA O PROCESSO CONVENCIONAL.....	52
TABELA 7 – PERCENTAGEM DE CURTOS-CIRCUITOS COM TRANSFERÊNCIA METÁLICA ($T_{cc} > 2,0$ MS).....	52
TABELA 8 – RESULTADOS DA ANÁLISE DE ESTABILIDADE (PROCESSO CONVENCIONAL).....	55
TABELA 9 – ANÁLISE DE VARIÂNCIA (ANOVA) PARA AS CARACTERÍSTICAS DE ESTABILIDADE.....	55
TABELA 10 – RESULTADO DAS CARACTERÍSTICAS ECONÔMICAS (PROCESSO CONVENCIONAL).....	59
TABELA 11 – ANÁLISE DE VARIÂNCIA (ANOVA) PARA AS CARACTERÍSTICAS ECONÔMICAS.....	59
TABELA 12 – RESULTADO DAS CARACTERÍSTICAS GEOMÉTRICAS (PROCESSO CONVENCIONAL).....	64
TABELA 13 – ANÁLISE DE VARIÂNCIA (ANOVA) PARA AS CARACTERÍSTICAS GEOMÉTRICAS.....	65
TABELA 14 – PARÂMETROS DE SOLDAGEM PARA O PROCESSO PULSADO.....	67
TABELA 15 – ANÁLISE DE VARIÂNCIA (ANOVA) PARA A ESTABILIDADE DO ARCO.....	67
TABELA 16 – RESULTADOS DA ANÁLISE DE ESTABILIDADE (PROCESSO PULSADO).....	69
TABELA 17 – RESULTADO DAS CARACTERÍSTICAS ECONÔMICAS (PROCESSO PULSADO).....	71
TABELA 18 – ANÁLISE DE VARIÂNCIA (ANOVA) PARA AS CARACTERÍSTICAS ECONÔMICAS.....	71
TABELA 19 – RESULTADO DAS CARACTERÍSTICAS GEOMÉTRICAS (PROCESSO PULSADO).....	73
TABELA 20 – ANÁLISE DE VARIÂNCIA (ANOVA) PARA AS CARACTERÍSTICAS GEOMETRICAS.....	73

CAPÍTULO I

Introdução

Apesar de sua aparente simplicidade, a soldagem envolve uma gama de conhecimentos que estão implicitamente envolvidos na execução de uma junta soldada. A engenharia de soldagem é, na verdade, um somatório de conhecimentos que engloba diversas áreas da engenharia elétrica, estrutural, mecânica, metalúrgica, química e da física aplicada. A soldagem é amplamente empregada na fabricação de componentes de estruturas metálicas e de equipamentos para as mais diversificadas finalidades incluindo a construção naval e a civil, os vasos de pressão, as tubulações, as usinas hidrelétricas, materiais metroviário e ferroviário, componentes nucleares etc [1]. A soldagem também encontra grande aplicação em serviços de manutenção, como o enchimento de falhas, reparos de trilhos, depósitos superficiais de alta dureza, recuperação de ferramentas, dentre outras aplicações [1].

Em função do desenvolvimento dos processos de fabricação e da engenharia de materiais, os processos de soldagem sofreram nos últimos anos, um grande avanço tecnológico, tanto relacionado aos processos quanto ao desenvolvimento de novos consumíveis. A tecnologia da soldagem tende a acompanhar a crescente modernização industrial e as novas exigências impostas pelo mercado, as quais visam uma maior produtividade, e uma melhor qualidade, sendo isto conseguida a custos cada vez menores. Tudo isso somados à evolução da eletrônica, da informática e da metalurgia têm impulsionado o desenvolvimento e a aplicação industrial de processos semi-automáticos e automáticos [2]. Com o intuito de se conseguir processos mais contínuos e mais econômicos que os processos manuais, desenvolveu-se nestes últimos anos fontes eletrônicas mais modernas, proporcionando um maior controle operacional dos processos contínuos como é o caso da soldagem MIG/MAG, do arco submerso e do arame tubular. Este último é um processo de relevante importância tecnológica, uma vez que une as principais vantagens do eletrodo revestido e do processo MIG/MAG [3, 4].

Após vários anos de pesquisa, o arame tubular alcançou o nível de desenvolvimento exigido no metal de solda nas modernas estruturas. A soldagem com proteção gasosa (FCAW-G) é um processo que vem sendo bastante utilizado nos últimos anos [5]. Neste processo, o arco voltaico se forma entre a peça e o eletrodo, sendo protegido pela ação de um gás externo e pela decomposição de um fluxo alojado no interior do arame [2, 5].

Hoje, o processo FCAW-G, devido a versatilidade dos arames, possibilita a obtenção de um melhor nível de resistência mecânica e melhor tenacidade com uma maior taxa de deposição, possibilitando a soldagem em todas as posições [2, 7].

Para o processo de soldagem com proteção gasosa, muitos estudos vêm

avançando, principalmente na área metalúrgica, como é o caso do estudo da influência do gás de proteção sobre as propriedades metalúrgicas do metal depositado por esse processo [9]. Alguns resultados da influência benéfica da mudança do gás CO₂ (comumente utilizado na proteção gasosa do arame tubular) para uma mistura de Argônio e CO₂ são verificados através da obtenção de melhores propriedades metalúrgicas [9]. Desta maneira, no presente trabalho realiza-se um levantamento das características operacionais, do arame tubular AWS E71T-1 com base nas características econômicas do consumível, nas características geométricas da solda, e na transferência metálica, empregando-se o gás de CO₂ puro e uma mistura de Ar e CO₂, variando-se a DBCP em 20 mm e 25 mm, em três níveis de corrente tanto em soldagem com corrente convencional (tensão constante) como em corrente pulsada.

CAPÍTULO II

Revisão Bibliográfica

Caracterização do processo

O processo de soldagem a arame tubular pode ser automático ou semi-automático e normalmente utiliza uma fonte de energia do tipo tensão constante. Existem duas variações para o processo, uma com a proteção adicional de um gás externo (Gas Shielded Arc Welding / FCAW-G) e a outra sem a proteção externa de gás (Self Shielded Flux Cored Arc Welding / SS-FCAW) [1].

A Figura 1 apresenta o esquema da soldagem e os elementos presentes durante a soldagem a arame tubular com proteção gasosa [10].

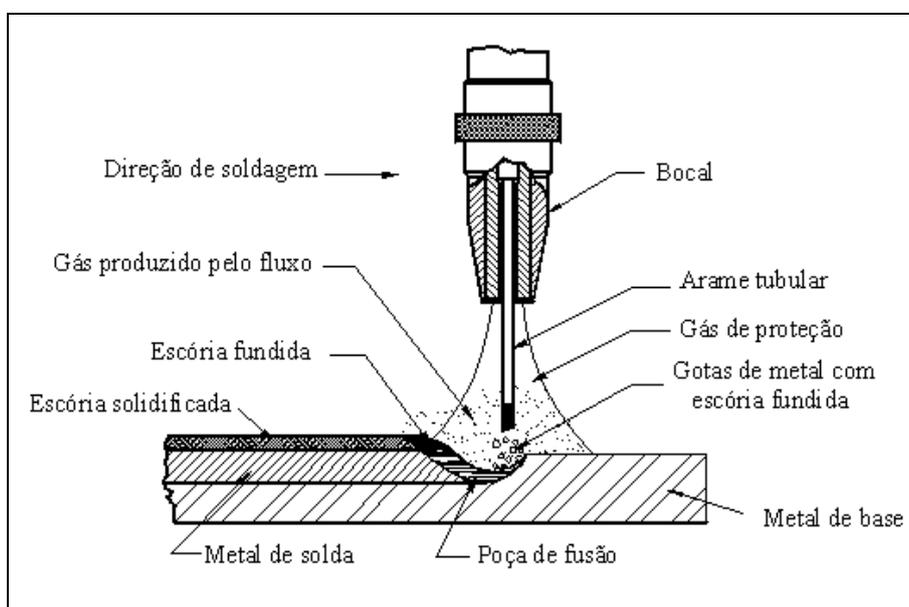


Figura 1 – Esquema da soldagem arame tubular com proteção gasosa [10].

Este processo utiliza um eletrodo consumível na forma de arame contínuo, fornecido em bobinas. Os eletrodos consumíveis geralmente são fabricados em diâmetros que variam de 0,8 mm a 3,2 mm e sua configuração geométrica pode ser do tipo simples ou “multifolder” conforme ilustrado na Figura 2 [2, 3, 5].

Como é mostrado na Figura 2, os arames tubulares possuem diversas seções e a uniformidade no preenchimento de fluxo ao longo do comprimento do arame é uma característica que define o nível de sua produção tecnológica. Como para a maioria dos consumíveis usados na soldagem, a técnica de sua fabricação, a composição química e o teor de seus insumos não são de domínio público. Os dados publicados na literatura técnica não correspondem na íntegra às reais formulações dos arames, haja vista que os fabricantes

muitas vezes utilizam formulações empíricas para os seus produtos e mesmo assim não divulgam os resultados obtidos. Os dados existentes são produtos de pesquisas realizadas em distintas instituições geralmente não vinculadas aos fabricantes.

Segundo a literatura técnica, um arame tubular para a soldagem a arco elétrico é constituído por uma capa metálica que aloja em seu interior um fluxo de composição química um tanto complexa [5]. Esta capa metálica pode ser de aço baixo carbono ou de um material similar ao que será soldado, como é o caso da soldagem de aço inoxidável. O fluxo é composto por uma mistura de materiais que tem a função de garantir além das características metalúrgicas, a proteção da poça de fusão e as características operacionais. A mistura do fluxo pode incluir pó metálico (ferro-liga e elementos de liga), compostos minerais, fluxos sinterizados, compostos químicos elementares ou complexos. Assim, suas principais funções são relacionadas à presença e ao teor dos elementos formadores de gás, de escória, de estabilizadores do arco, dos desoxidantes/desnitretantes e dos elementos de liga. Neste sentido, a caracterização do processo metalúrgico e das características operacionais se baseia na classificação e na composição do arame tubular, a qual é apoiada principalmente nos elementos formadores de escória (arames com proteção gasosa) e nos elementos formadores de gás/escória (arames autoprotégidos).

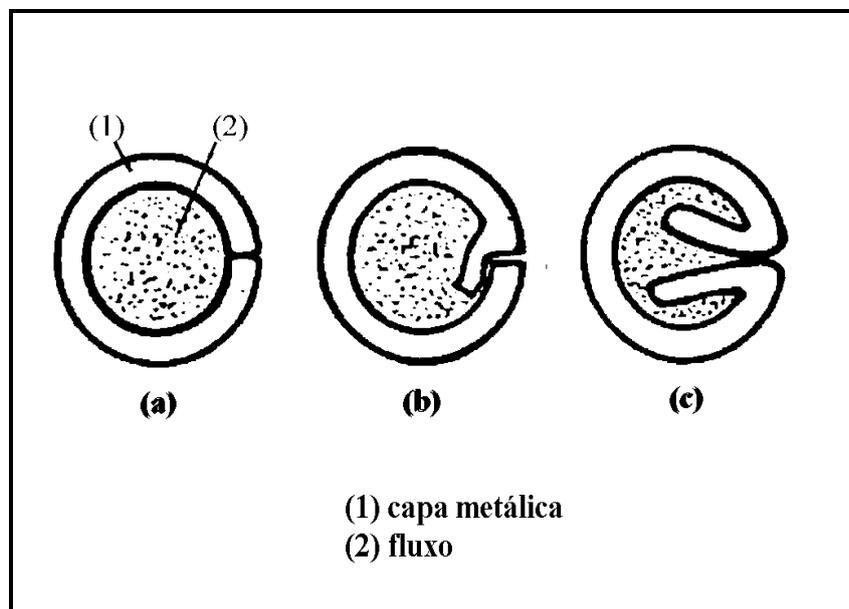


Figura 2 – Geometria da seção transversal de arames tubulares [2]. (a) simples, (b) e (c) multifolder.

Para arames com proteção gasosa, têm-se três grandes classes: eletrodo com fluxo rutilico, com fluxo básico e arame tubular com núcleo metálico.

Os arames em que o fluxo é rutilico são os mais comuns. Eles proporcionam um arco mais suave sobre uma grande faixa de corrente de soldagem, boa conformação do cordão

e podem ser utilizados em todas as posições. A sua boa capacidade de soldagem em todas as posições é conseguida pela utilização de uma escória que solidifica a altas temperaturas, permitindo assim a sustentação da poça de fusão. Os arames tubulares padrões não produzem soldas com boa resistência ao impacto ou soldas com baixos teores de hidrogênio (abaixo de 5 ml/100g). Contudo, com recentes desenvolvimentos, a adição de microligantes e avanços na manufatura de tais consumíveis têm proporcionado uma melhora nessas propriedades, como foi possível observar no trabalho de Mota [2], utilizando o arame tubular autoprottegido da classe rutilica (E71T-7) [13].

Os arames com fluxo básico são utilizados quando se requer depósitos com boas propriedades mecânicas. A principal desvantagem desses arames é sua operacionalidade. Comparado aos arames com fluxo rutilico, esses arames têm um arco menos estável, produz solda com maior convexidade e gera maior nível de respingos. Sua utilização em pequenos diâmetros para soldagem fora da posição plana não é aconselhada em função do considerável nível de corrente. Em adição a esse fator, o fluxo básico não produz uma escória que possa sustentar a poça de fusão como a escória gerada pelo fluxo rutilico [13].

O arame tubular com núcleo metálico promove uma maior taxa de deposição e uma pequena proteção por escória. Geralmente opera com a utilização de um gás rico em argônio com níveis de tensão e de corrente que permitam a transferência no modo goticular. As correntes utilizadas nesse processo geralmente são de valores elevados. [13].

Designação dos tipos de arames para soldagem com proteção gasosa

A identificação desses eletrodos é baseada em um sistema adotado pela AWS, o qual especifica cada um dos símbolos componentes da classificação. As Figuras 3 e 4 ilustram os componentes e suas respectivas designações.

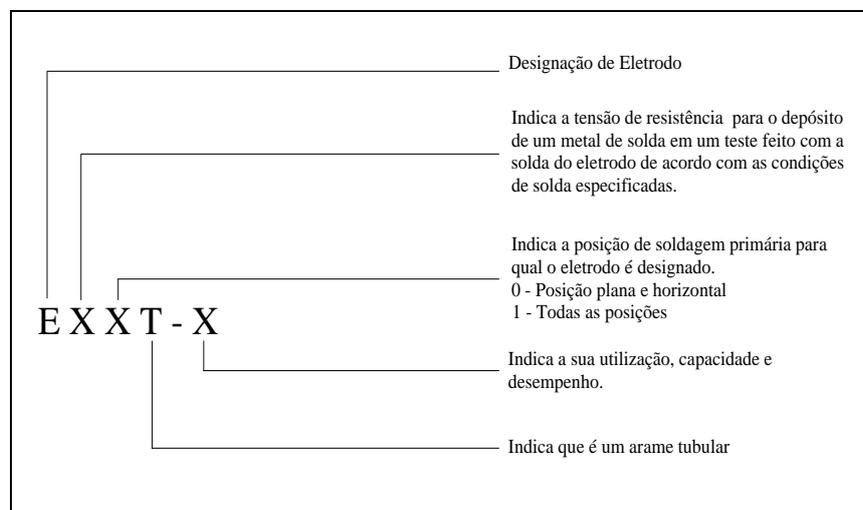


Figura 3 – Identificação para eletrodos FCAW de aço médio carbono [5].

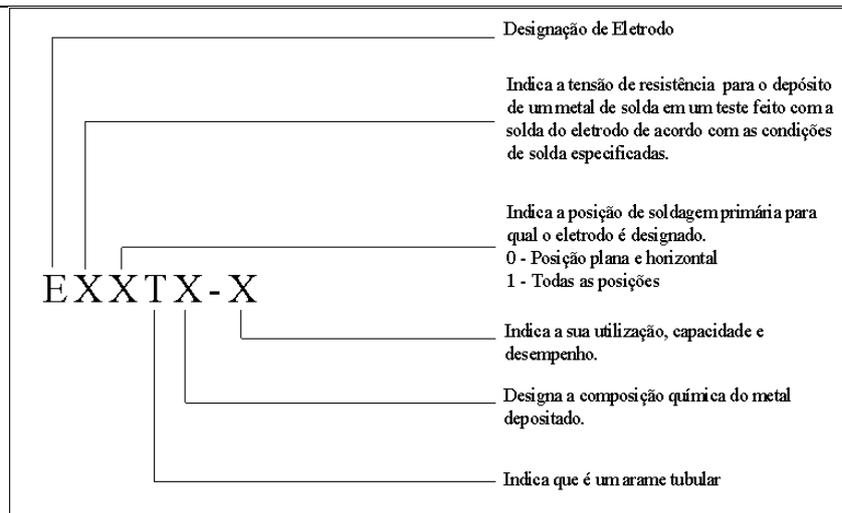


Figura 4 – Identificação para eletrodos FCAW de aço baixa liga [5].

A Tabela 1 explica o significado do último dígito da designação dos arames tubulares de aços médio carbono.

Tabela 1 – Proteção e polaridade requeridas para os arames tubulares para aços de médio carbono [5].

Proteção e polaridade requeridas para arame tubular de médio carbono		
Classificação AWS	Proteção externa	Polaridade e corrente
EXXT – 1 (multipasse)	CO ₂ ou Ar e CO ₂	cc, eletrodo positivo
EXXT – 2 (passe simples)	CO ₂	cc, eletrodo positivo
EXXT – 3 (passe simples)	Não	cc, eletrodo positivo
EXXT – 4 (multipasse)	Não	cc, eletrodo positivo
EXXT – 5 (multipasse)	CO ₂	cc, eletrodo positivo
EXXT – 6 (multipasse)	Não	cc, eletrodo positivo
EXXT – 7 (multipasse)	Não	cc, eletrodo negativo
EXXT – 8 (multipasse)	Não	cc, eletrodo negativo
EXXT – 10 (passe simples)	Não	cc, eletrodo negativo
EXXT – 11 (multipasse)	Não	cc, eletrodo negativo
EXXT – G (multipasse)	*	*
EXXT – GS (passe simples)	*	*

De acordo com o fornecedor e o usuário [5].

EXXT-1. Eletrodos de fluxo rutilico para o emprego em corrente contínua positiva com a utilização de CO₂. Entretanto, misturas gasosas de argônio e CO₂ também são usadas. Esses eletrodos são designados para operações de simples passe ou multipasses. Os eletrodos T-1 favorecem a transferência metálica do tipo goticular (embora possa ocorrer outros tipos de destacamento) e são caracterizados por baixos níveis de respingos e por um moderado volume de escória [5].

EXXT-2. Eletrodos de fluxo rutilico para a utilização em corrente contínua positiva. São basicamente eletrodos do Tipo T-1 com um alto teor de manganês e/ou silício. São designados para a soldagem na posição plana e horizontal. Os arames da classe T-2 utilizam o manganês como principal elemento desoxidante, promovendo ótimas propriedades mecânicas em simples deposição. As características do arco e de deposição são similares às dos

eletrodos T-1 [5].

EXXT-5. São eletrodos para a utilização em corrente contínua positiva e com proteção de CO₂, muito embora seja possível a utilização de uma mistura gasosa como nos arames do grupo T-1. Esses eletrodos são caracterizados por sua transferência globular. É um eletrodo que produz alguns salpicos e sua escória não encobre completamente o cordão gerado durante o processo. O metal depositado por esses eletrodos tem melhor tenacidade e resistência à trincas se comparado aos das Classes T-1 e T-2. É um grupo de eletrodos básicos [5].

EXXT1-X. Classe de eletrodos que utiliza proteção gasosa de CO₂, embora seja possível a utilização de uma mistura gasosa de argônio e CO₂. São caracterizados por sua transferência goticular, por poucos salpicos e por um moderado volume de escória, com uma completa cobertura do cordão de solda pela escória [5].

EXXT5-X. Classe de eletrodos que utiliza tanto a proteção gasosa de CO₂ como a mistura de Ar e CO₂. Designado tanto para simples quanto para multipasses. São caracterizados pela transferência globular, e por uma fina escória, que muitas vezes não chega a encobrir completamente o cordão de solda. A solda depositada por estes eletrodos tem melhores propriedades mecânicas quando comparada aos depósitos produzidos pelos eletrodos da Classe T1-X [5].

Designação dos tipos de arames para soldagem sem proteção gasosa

EXXT-3. São usados com corrente contínua positiva, e têm uma transferência tipo goticular. O sistema de escória é projetado para dar características que possibilitem velocidades de soldagem muito altas. Os eletrodos são usados para fazer único passe de solda nas posições plana, horizontal, e em posições inclinadas (até 20°), em chapas de até 5 mm. Não são recomendados para soldagem de materiais com espessura maior que 5 mm, e nem para realizar soldas de multipasses [5].

EXXT-4. Operam em corrente contínua positiva e proporcionam a transferência do tipo globular. O sistema de escória é projetado para dar característica que permite uma alta taxa de deposição, enquanto que a desulfurização no metal de solda, faz com que a solda depositada resista à trincas. Estes eletrodos são projetados para baixa penetração, adaptando-se para uso em juntas com pequeno ajuste vertical e, para soldagem em simples e multipasses nas posições plana e horizontal [5].

EXXT-6. Operam em corrente contínua positiva e têm uma transferência do tipo goticular. O sistema de escória é designado para dar excelentes propriedades de impacto a baixas temperaturas, alta penetração e boa remoção de escória. Os eletrodos são usados para soldagem multipasses, nas posições plana e horizontal [5].

EXXT-7. Operam em corrente contínua negativa. O sistema de escória é projetado para dar características que permitem usar eletrodos de maiores tamanhos para altas taxas de deposição e eletrodos de tamanhos menores são usados para soldagem em todas as posições. A escória também deve desulfurizar o metal de solda, o qual ajuda fazer a solda depositada resistir à trincas. Os eletrodos são usados para a soldagem de simples e multipasses [5].

EXXT-8. Operam em corrente contínua negativa. O sistema de escória tem características que tornam possível o uso destes eletrodos para soldagem em todas as posições. A escória também deve proporcionar boas propriedades ao impacto a baixa temperatura, a desulfuração do metal de solda e ainda melhorar a resistência à trinca na solda. Os eletrodos são usados para soldagem simples e multipasses [5].

EXXT-10. Operam em corrente contínua negativa. O sistema de escória permite realização de solda a alta velocidade. Os eletrodos são usados para fazer um único passe de solda, em materiais de diversas espessuras nas posições plana, horizontal e inclinada (até 20°) [5].

EXXT-11. Operam em corrente contínua negativa e proporcionam uma transferência metálica do tipo goticular. O sistema de escória permite soldagem em todas as posições e a altas velocidades de soldagem. No geral estes eletrodos, são usados para soldagem em simples e multipasses, em todas as posições [5].

EXXT-G. São eletrodos para soldagem multipasses, e que não estão abrangidos por quaisquer das classificações definidas. O sistema de escória, características de arco, aparência da solda e polaridade não estão definidos na norma [5].

EXXT-GS. O eletrodo da classificação GS é para soldagem em simples passe e que não são abrangidos por qualquer outra classificação definida. O sistema de escória, características de arco, aparência da solda e polaridade não estão definidos na norma [5].

Arames tubulares de aço baixa liga

Arames tubulares são também comercialmente disponíveis para soldar aços de baixa liga. A descrição e a classificação destes arames estão na mais recente edição da ANSI / AWS A5.29,- “Especificação para Eletrodos de Aço de Baixa Liga para Soldagem com Arames Tubulares”. Os eletrodos são projetados para produzir depósitos com composições químicas e propriedades mecânicas semelhantes aos que são produzidas com eletrodo revestido para soldagem de aços de baixa liga. Alguns tipos de eletrodos são projetados para soldar em todas as posições, enquanto que outros são limitados as posições plana e horizontal. Assim como para os arames tubulares de aço de médio carbono, existe um sistema de identificação usado pela AWS para descrever as várias classificações para os arames tubulares de aço baixa liga.

A Figura 4 ilustra os componentes desta identificação [5].

A ANSI / AWS A5.29, lista cinco classificações diferentes para arames de aço baixa liga usados na soldagem FCAW. A descrição destes e o uso planejado são resumidos abaixo [5].

EXXT4-X. São eletrodos autoprotetidos da classificação de T4-X, que operam em corrente contínua positiva e têm uma transferência metálica de tipo globular. O sistema de escória é projetado para dar características que tornam possível a obtenção de alta taxa de deposição e a desulfurização do metal de solda, fazendo com que a solda depositada resista à trincas. Estes arames eletrodos são projetados para baixa penetração, sendo habilitados para soldagem em único e multipasses nas posições plana e horizontal [5].

EXXT8-X. São eletrodos autoprotetidos da classificação T8-X, que operam em corrente contínua negativa. O sistema de escória possui características para possibilitar o uso destes eletrodos em todas as posições de soldagem. O sistema de escória também produz boa resistência ao impacto à baixa temperatura no metal de solda, boa dessulfurização do metal de solda, resistindo à trincas. Os eletrodos são usados em soldagem de simples e de multipasses [5].

EXXTX-G. A classificação TX-G é para soldagem em simples passe que não é abrangida por qualquer outra classificação atualmente definida. O sistema de escória, as características de arco, a aparência da solda e polaridade não estão definidos na norma [5].

Transferência metálica

A natureza da transferência metálica tem sido de grande interesse desde quando os processos de soldagem a arco com metal de adição foram implementados. Isto porque o modo de destacamento poderá afetar a estabilidade do arco, a penetração do cordão de solda, a taxa de deposição do arame/eletrodo, a posição de soldagem e a qualidade da solda. Portanto, o conhecimento de como a transferência metálica influencia determinado processo de soldagem é importante para o seu controle e automação, assim como para o desenvolvimento de novos consumíveis.

Baseado nas características de transferência metálica, o Instituto Internacional de Soldagem (IIW) classificou os modos de destacamento em três grupos principais: transferência por vôo livre, por contato e guiada pela escória. Nesses grupos, têm-se oito tipos de transferência metálica: globular, com repulsão, goticular, goticular com alongamento, goticular rotacional, por explosão, por curto-circuito e guiada pela escória. A Figura 5 mostra estes oito tipos de transferência metálica segundo o Instituto Internacional de Soldagem (IIW).

a) Transferência metálica globular

É caracterizada principalmente pela transferência de gotas grandes (com diâmetros

maiores que o diâmetro do eletrodo) em frequência muito baixa [14]. Ocorre geralmente em tensões não muito baixas e correntes moderadas, porém com a utilização de CO_2 como gás de proteção, a transferência globular pode acontecer também em correntes elevadas. Devido ao fato deste tipo de transferência ser diretamente dependente da força peso, a soldagem é limitada à posição plana [15].

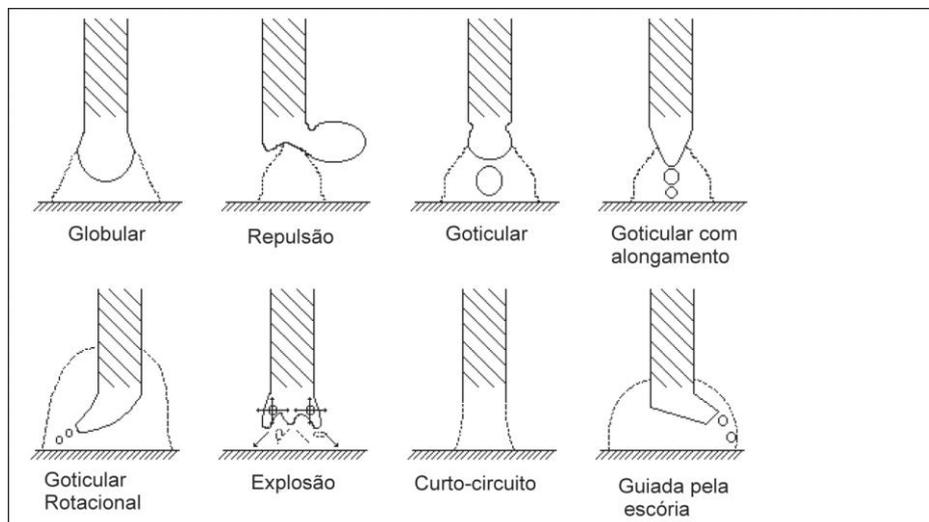


Figura 5 – Tipos de transferência metálica segundo IIW [15].

b) Transferência metálica com repulsão

Ocorre principalmente quando se utiliza eletrodo em polaridade negativa e gases de proteção com alta condutibilidade térmica. A alta condutibilidade térmica destes gases faz com que o núcleo de condução do arco fique reduzido, aumentando a concentração do arco. Com pequeno núcleo, o arco exerce uma pressão elevada sobre a parte inferior da gota, repelindo-a de sua trajetória normal [15]. Pode ocorrer na soldagem MAG com CO_2 e na soldagem com arame tubular autoprotégido.

c) Transferência metálica goticular

É caracterizada pela transferência de pequenas gotas a alta frequência, com geração de poucos respingos e elevada estabilidade do arco. Ocorre normalmente em altas correntes e tensões moderadas. É obtida de uma forma geral com argônio como gás principal de proteção. Quando se eleva a corrente de forma a superar um valor crítico (corrente de transição), as gotas diminuem de tamanho (diâmetro próximo ao do eletrodo) e o arco passa a cobri-las totalmente [15].

d) Transferência metálica goticular com alongamento

Para correntes maiores que as da transferência goticular, a ponta do eletrodo se torna cônica e gotas muito pequenas são formadas. Estas gotas são destacadas axialmente do eletrodo, muito próximas umas das outras, quase formando um jato contínuo. É este

mecanismo de transferência que é denominado goticular com alongamento [15].

e) Transferência metálica goticular rotacional

Para correntes ainda maiores que as obtidas na transferência goticular com alongamento, a extremidade do eletrodo fica superaquecida, perde resistência mecânica e se torna mais maleável. Com esta mudança nas características físicas do eletrodo, o campo magnético é capaz de gerar um efeito torsional no eletrodo de maneira que as gotas passam a ser transferidas na direção radial do arco. Este tipo de transferência é conhecido como goticular rotacional [15].

f) Transferência metálica por explosão

Resulta de explosões de bolhas de gás presentes no interior da gota. Estas micro-explosões geram diversas gotas novas de dimensões variáveis. Ocorre principalmente no processo eletrodo revestido [15].

g) Transferência metálica por curto-circuito

Ocorre geralmente em tensões baixas e correntes não muito elevadas, principalmente com a utilização de CO₂ como gás de proteção. É caracterizado pelo toque periódico da gota na poça de fusão no momento da sua transferência. Isto acontece principalmente devido à diferença entre a velocidade de alimentação do arame eletrodo e a taxa de fusão do mesmo, em regime de arco aberto [15]. A ação repetitiva dos curtos-circuitos só pode ocorrer se a flutuação da taxa de fusão for regularmente abaixo e acima da velocidade de alimentação do arame.

A frequência de transferência de curtos-circuitos varia de 20 a 200 vezes por segundo, o que irá depender das condições de soldagem. A cada toque da gota na poça de fusão, ocorre a extinção do arco devido ao curto-circuito. Nesse momento a corrente aumenta rapidamente de valor e a tensão cai bruscamente [15]. Pela Figura 6 pode-se explicar melhor a transferência metálica regular por curto-circuito.

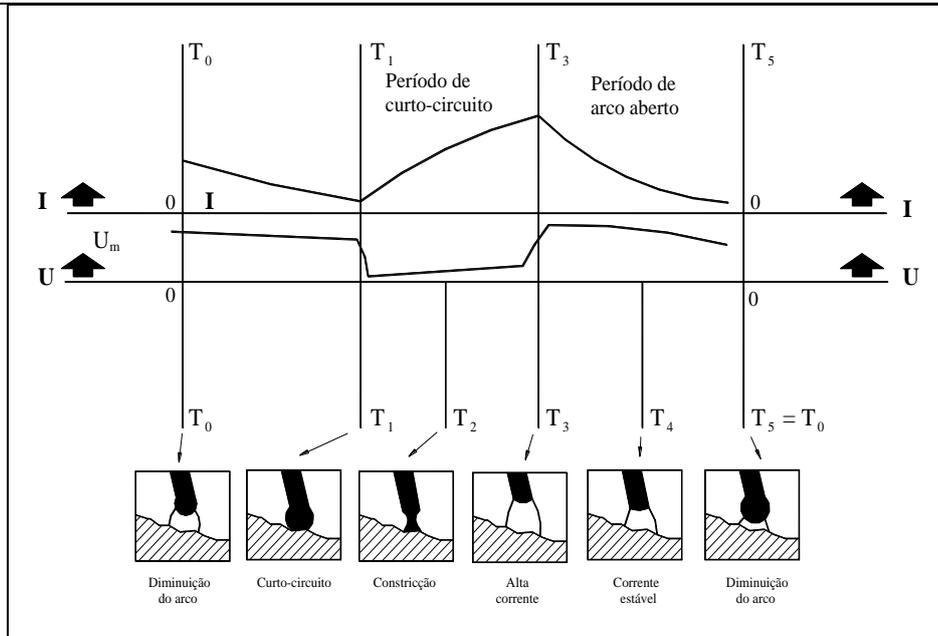


Figura 6 – Transferência por curto-circuito [16].

Em T_0 caracteriza-se a fase de formação e crescimento da gota na ponta do arame, com isso o comprimento do arco diminui, causando uma pequena queda de tensão.

Em T_1 a gota formada toca a poça de fusão, a tensão tende a cair bruscamente e a corrente aumenta em elevada taxa.

Em T_2 parte da gota já foi transferida.

Em T_3 ocorre o destacamento total da gota, a tensão sobe caracterizando um pico de reignição. A corrente neste mesmo instante começa a cair para valores de regime.

Em T_4 a tensão e corrente se estabilizam, começa então a formação de outra gota.

Em T_5 ocorre o mesmo descrito para T_0 , reiniciando o ciclo de transferência metálica.

A transferência por curto-circuito é adequada para soldagem de aços, porém para o alumínio, que apresenta elevada condutibilidade térmica, a soldagem com este tipo de transferência metálica, não produz geralmente bons resultados. A alta condutibilidade térmica deste material faz com que a poça resfrie e solidifique rapidamente, aprisionando gases e originando porosidades [15].

h) Transferência metálica guiada pela escória

Acontece quando a gota formada na ponta do eletrodo é envolvida pela escória, que serve como guia para sua transferência. Ocorre nos processos eletrodo revestido, arco submerso e no processo arame tubular.

Os arames tubulares de seção simples são caracterizados pela transferência globular não axial de gotas metálicas médias e grandes [2, 3, 6]. As gotas formadas crescem girando na borda do arame, de forma que a transferência, em muitos casos, é irregular em função da diferença das condutibilidades térmica e elétrica do fluxo e do arame. Esta diferença de condutibilidade promove o atraso da fusão do fluxo em relação à fusão do metal e, como consequência, há excesso de fluxo não fundido na ponta do eletrodo. Com a formação de gás em função da fusão desse fluxo, há um escoamento desse gás em direção a poça de fusão, o que dificulta a formação e transferência da gota no sentido axial do eletrodo [2].

Para os arames de seção mais complexa, a condução de energia elétrica e de energia térmica entre o metal/fluxo é mais eficiente e uniforme, pois a relação com a área de contato entre as partes é maior que nos arames de seção simples [2, 6]. Assim, nesses arames, o preaquecimento do eletrodo por efeito joule, torna-se mais intenso promovendo assim uma maior concentração e um maior aproveitamento da energia gerada no arco para fusão do arame.

Os tipos de transferência metálica no arame tubular estão relacionados com o balanço de forças que atuam no destacamento das gotas e com as características dos processos de soldagem. A Figura 7 apresenta as forças mais prováveis de atuarem no destacamento da gota na ponta do eletrodo. São elas: peso (F_p), tensão superficial gota/casca metálica (F_{tm}) e gota/escória (F_{te}), força de compressão (eletromagnética) (F_c), força de arraste do plasma (F_d), força de evaporação metálica (F_v) e força devido às reações químicas (formação de bolha de gás no interior da gota) (F_q) [17].

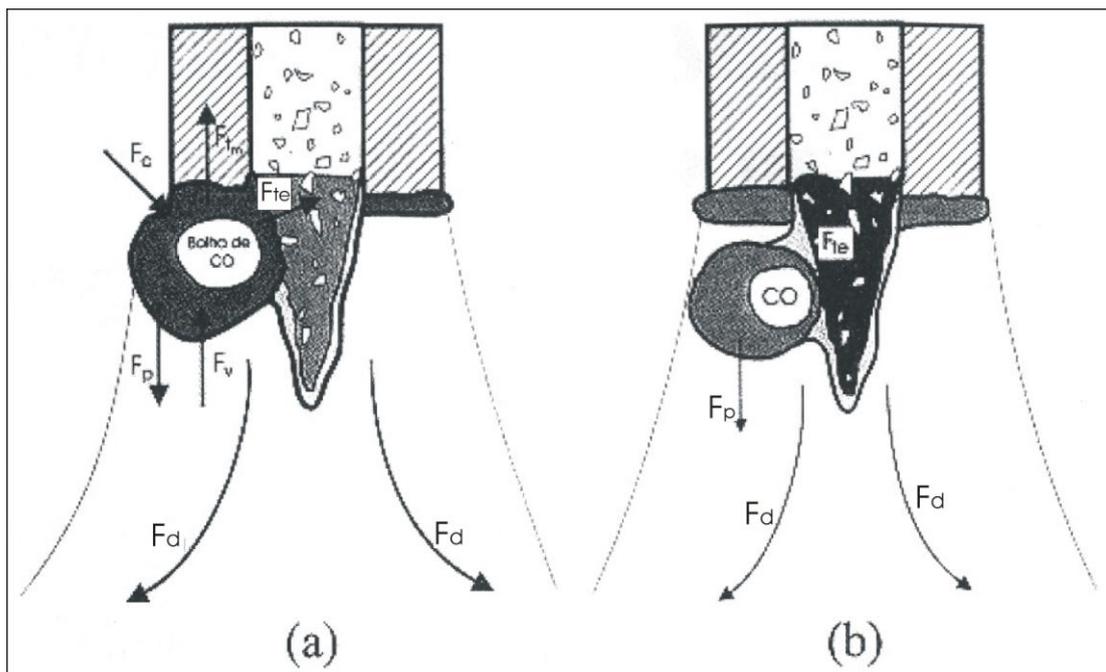


Figura 7 – Esquema das forças que agem na transferência metálica na soldagem a arame tubular. Em (a), gota ligada fisicamente à casca metálica, em (b), gota ligada somente à

Na transferência metálica do processo de soldagem com arame tubular foram observados três estágios diferentes: formação e crescimento da gota, deslocamento e destacamento [17]. O deslocamento possui duas etapas similares à transferência na soldagem com arco submerso, conforme mostra a Figura 7. Na primeira etapa a gota está ligada fisicamente à casca metálica. Já na segunda etapa, ela está ligada somente à projeção de escória na ponta do arame. Na primeira etapa, Figura 7(a), a corrente flui pela gota e a força de compressão (F_c) tem ação na gota, junto com a força do arraste do plasma (F_d), do gás de proteção (F_d), tensão superficial gota/casca metálica (F_{tm}) e gota/projeção de escória (F_{te}), força devido às reações químicas (formação de bolha de gás no interior da gota) (F_q) e o peso (F_p). No caso de polaridade direta, a força devido a evaporação metálica (F_v) também age no sentido de dificultar o destacamento da gota [17].

Após a gota separar-se da casca metálica, a corrente volta a ser conduzida entre a casca metálica e a peça. A gota que se encontra ligada à projeção de escória, na segunda etapa da transferência, está sujeita às seguintes forças: força peso (F_p), tensão superficial gota/escória (F_{te}), forças devido às reações químicas (F_q) e arraste de plasma (F_d), conforme indica a Figura 7 (b). Neste caso, devido a diferença de condutividade elétrica entre o metal e a escória, a força de compressão não atua na gota [17].

Através do trabalho de Brandi e Souza [17] observou-se que sempre as gotas obtidas pelo E71T-5 são maiores que as gotas geradas pelo E71T-1. Este fato é um indício de que as gotas são ocas, conforme mostrado na Figura 8. Nesta figura percebe-se que existe uma interação forte entre a gota líquida e a escória líquida na ponta do arame, que pode afetar a transferência metálica [17].

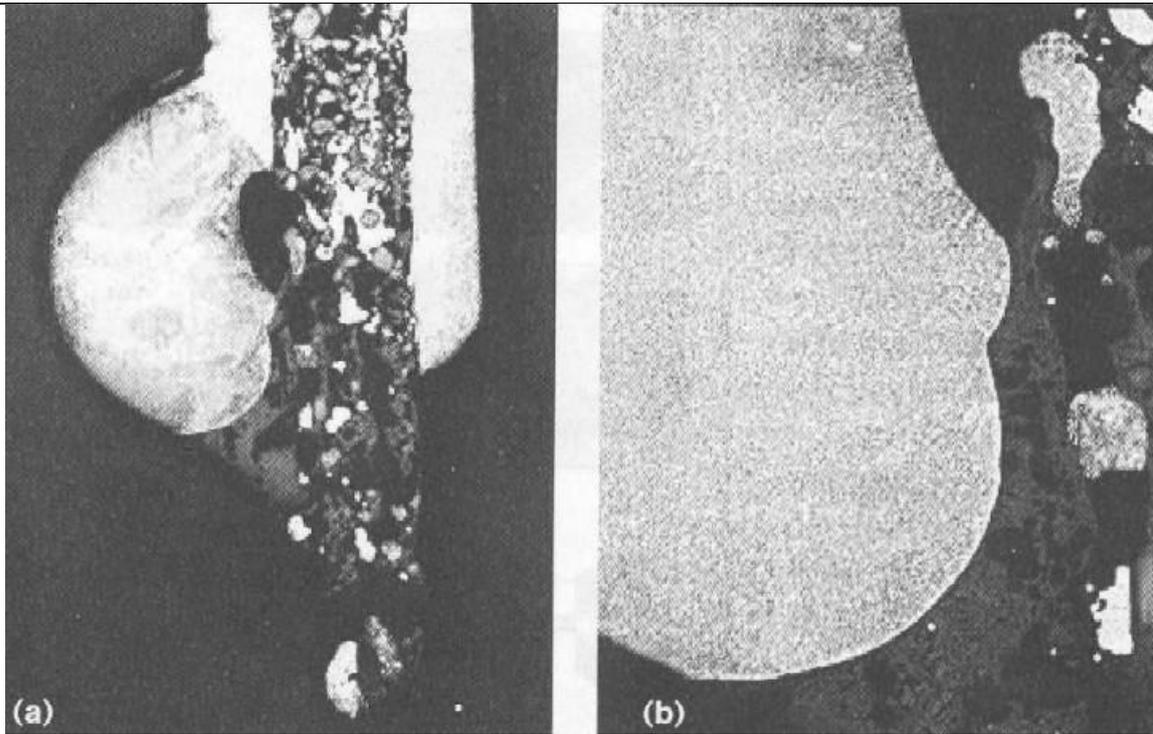


Figura 8 – Fotografia da ponta de um arame E71T-5. Em (a) vista geral da ponta (aumento de 19 X); em (b) detalhe mostrando a bolha de gás e a escória líquida envolvendo parte da gota (aumento de 60 X) [17].

Experimentos realizados por Brandi e Souza [17] mostram que um aumento no diâmetro da gota de um arame E71T-1 foi causado pela atuação da força devido à tensão superficial entre a escória e o metal líquido, que retardou o destacamento da gota. Simultaneamente, a força devido às reações químicas produz um aumento no diâmetro da gota, em função do crescimento de uma bolha de gás no interior da gota. A gota é transferida antes que a bolha de gás cresça e cause a sua explosão. Esta transferência é auxiliada pelo peso e pela força de arraste de plasma. A Figura 9 apresenta esquematicamente este comportamento, mostrando a transferência com arame de 1,2 mm e sua fotografia na parte superior da figura, e com arame de 1,6 mm e sua respectiva fotografia na parte inferior da figura.

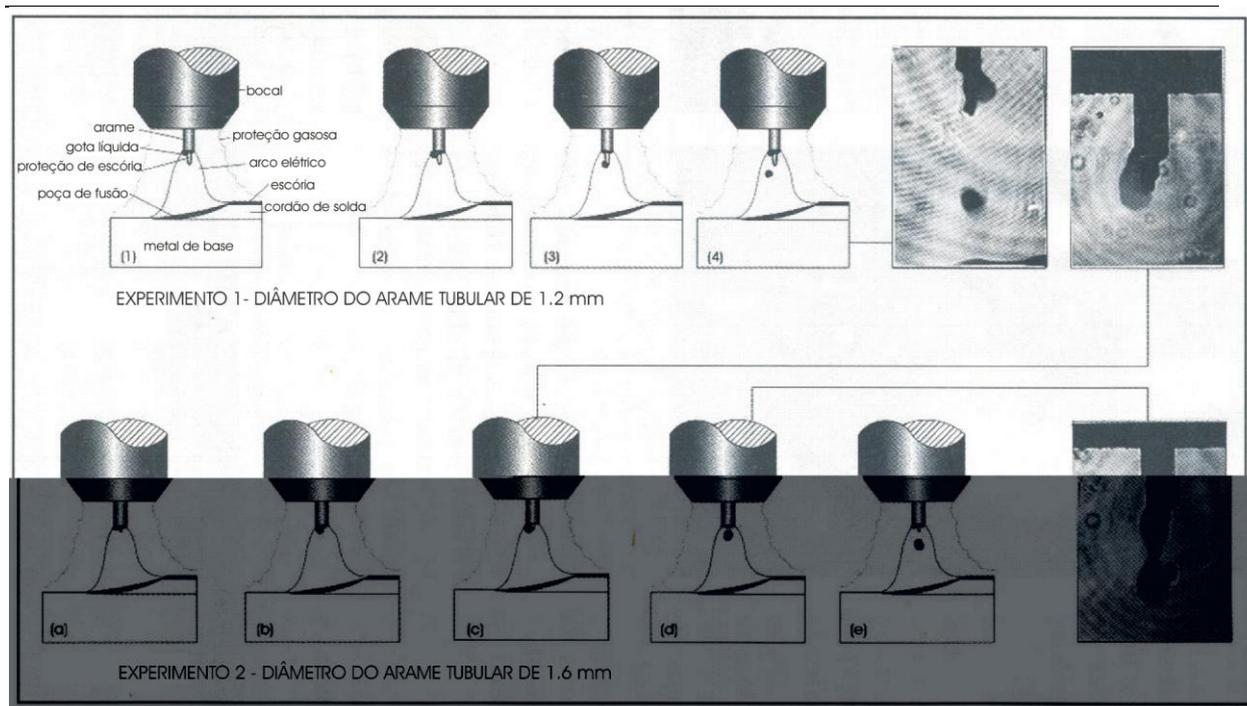


Figura 9 – Desenho esquemático do efeito do diâmetro do arame tubular na transferência metálica do arame E71T-1 na soldagem com a mistura Ar (75%) + CO₂ (25%) [17].

O aumento da corrente de soldagem e a redução do diâmetro do arame causaram uma redução no diâmetro das gotas, e ainda um pequeno aumento na projeção de escória para o arame E71T-1; isso pode ser verificado, com a utilização de recursos de análise propostos por Lockner e Matar [17 apud 17]. Esse resultado está associado à geração de calor na ponta do arame que, para correntes maiores, se dá basicamente por efeito Joule da casca metálica [7, 8 apud 17]. Observou-se ainda, que a transferência, tanto para o arame E71T-1 como para o arame E71T-5, não acontece axialmente.

Constatou-se com isso que a transferência metálica para o arame tubular ocorre em três estágios (gota presa ao arame, gota presa à projeção de escória e destacamento da gota) e que as forças atuam no arco diferentemente para cada estágio de destacamento. Verificou-se também que as forças oriundas das reações químicas atuam no sentido de aumentar o diâmetro da gota em função do crescimento de uma bolha de gás em seu interior, sendo mais acentuado para arames básicos [17].

Brandi e Souza [17] constataram ainda que o aumento no diâmetro do arame causou um acréscimo no diâmetro das gotas, para ambos os arames estudados (E71T-1 e E71T-5), devido a maior atuação das forças de tensão superficial. Observou-se ainda que o tipo de polaridade influi diretamente na formação da gota metálica, de forma que para o arame E71T-1, a polaridade reversa promove o aumento no diâmetro da gota em função da força de evaporação metálica e aumento da projeção de escória. O aumento do efeito Joule com o aumento da extensão de arame livre também provocou um aumento do diâmetro da gota [17].

Natureza da corrente

Corrente para fonte operando em tensão constante

Este é o modo mais comumente usado nos processos MIG/MAG e arame tubular. Basicamente requer um ajuste de tensão e de uma velocidade de alimentação do arame para o trabalho a ser realizado. A fonte de soldagem é do tipo tensão constante, de maneira que uma pequena variação de tensão implica em uma grande variação no valor da corrente. A variação de tensão é ocasionada pela variação do comprimento do arco durante a soldagem. A flutuação do comprimento do arco provoca uma alteração na taxa de fusão. Este tipo de fonte em tensão constante é geralmente utilizado em processos nos quais o eletrodo (arame) é continuamente alimentado (tais como o MIG/MAG, arco submerso e arame tubular) porque mantém o comprimento do arco constante, apesar das possíveis flutuações que o mesmo possa sofrer [7].

Em soldagens MIG/MAG convencionais com baixas correntes médias, a transferência metálica é por curtos-circuitos.

Corrente para fonte operando em corrente constante

Quando a soldagem é realizada em processos tais como TIG e Eletrodo Revestido, é muito difícil para o soldador manter um preciso controle sobre o arco. Portanto para que não ocorra excessiva alteração na corrente de soldagem, a curva estática da fonte deve ser do tipo “corrente constante” (ou “tombante”) [7]. Este tipo também pode ser usado para os processos MIG/MAG e FCAW com controle externo da velocidade de alimentação do arame.

Corrente em regime pulsado

Nos últimos anos, consideráveis desenvolvimentos foram realizados com base no controle da corrente de soldagem [13, 18]. Com as novas tecnologias para a fabricação de fontes de energia para soldagem a arco voltaico, tornou-se possível a utilização da corrente pulsada para os processos de soldagem com alimentação contínua e com eletrodos permanentes. Esse desenvolvimento tem sido utilizado com grande sucesso na soldagem de arames tubulares com proteção gasosa (FCAW-G), atuando diretamente no controle da transferência metálica, pelo ajuste dos níveis de corrente utilizados.

Alguns pesquisadores apontam este tipo de tecnologia como uma ferramenta para a soldagem com arame tubular para fins específicos. Realizaram-se pesquisas mais avançadas utilizando, como experimento, a soldagem de arames tubulares com fluxos básicos e arames

tubulares com núcleo sólido, com controle da corrente. Visou-se a soldagem fora da posição, técnica muito complicada para esses dois tipos de arame. Essa complicação se dá em função do fluxo, para o arame básico e arame de núcleo metálico, em virtude dos altos níveis de corrente utilizados para sua fusão. Assim com o controle da corrente, busca-se o controle também da poça de fusão e, conseqüentemente, o controle da solidificação, auxiliando assim, a soldagem fora da posição. Com a pulsação da corrente, pode-se conseguir a soldagem a níveis mais baixos de corrente média e eficaz, conseguindo uma poça de fusão menos fluida, objetivando-se o controle desta em relação às forças gravitacionais [13, 18].

Logo, na soldagem com corrente pulsada (Figura 10), pode-se conseguir um arco estável através da otimização dos parâmetros de controle, mesmo para os arames tubulares. Isso porque, na pulsação de corrente, o valor da corrente de pulso (I_p) é selecionado para exceder o valor da corrente de transição e a corrente de base (I_b) é ajustada apenas para manter o arco aceso. Assim a corrente média e eficaz apresentam valores mais baixos que a corrente de transição (Equação 1 e 2). Acrescenta-se ainda que o uso da corrente pulsada proporciona uma redução na quantidade de fumos e de respingos durante a soldagem, assim como maior facilidade na soldagem de chapas finas e também na soldagem fora da posição plana [19].

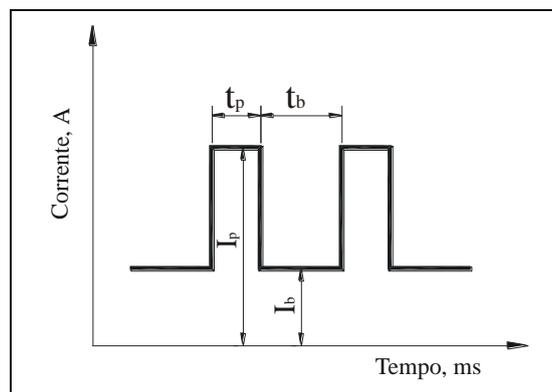


Figura 10 – Variáveis da corrente pulsada com imposição de corrente [19].

A corrente de pulso proporciona um efeito “pinch” mais acentuado, sobre o arame tubular que atua como uma força que causa a estrição do metal fundido, expulsando a gota e direcionando-a à poça de fusão. A duração de um ciclo determinará a quantidade de material a ser transferido por cada pulso. Através dos valores dos tempos de pulso (t_p) e de base (t_b), pode-se estimar quantas gotas podem ser transferidas por pulso, tomando-se como base o diâmetro do arame.

$$I_m = \frac{I_p \cdot t_p + I_b \cdot t_b}{t_p + t_b} \quad (1)$$

$$I_{ef} = \left[\frac{I_p \cdot t_p + I_b \cdot t_b}{t_p + t_b} \right]^{1/2} \quad (2)$$

onde :

I_p = corrente de pulso;

I_b = corrente de base;

t_p = tempo de pulso;

t_b = tempo de base.

No passado, essa técnica não encontrou uma ampla aceitação, pois os equipamentos de soldagem eram inadequados. Isto foi superado pela implementação de fontes modernas e pelo desenvolvimento do controle sinérgico que é neste caso, aplicado no sentido de que vários fatores coordenados contribuam para um resultado comum. No modo pulsado, são muitos os fatores responsáveis pela manutenção da operação de soldagem. De um modo geral, os parâmetros elétricos envolvidos na soldagem em corrente pulsada são definidos pela corrente de base (I_b), pela corrente de pulso (I_p) e pelos seus respectivos tempos de base (t_b) e de pulso (t_p), além da velocidade de alimentação (V_a) e da tensão de soldagem (U) [1].

Neste sentido, em função do maior número, não é fácil a tarefa de seleção dos parâmetros que se adequem às necessidades de estabilidade do arco, das características econômicas, da qualidade da solda e de suas propriedades mecânicas.

Conforme Braga [1] a concepção da corrente pulsada para o controle da transferência metálica não é nada mais que uma metodologia de antecipação de picos de corrente para transferir as gotas antes que estas se curto-circuitem na peça. Assim, evita-se intensa salpicagem e tem-se um arco com uma pressão razoavelmente homogênea sobre a poça líquida [1].

Entretanto, os picos de corrente devem satisfazer certos requisitos para que estes objetivos sejam alcançados. Assim, o tempo de permanência no valor de pulso deve ser tal que a energia gerada seja suficiente para a formação da gota e seu destacamento. A elevada corrente de pulso impõe que a corrente de base seja ajustada no patamar que possa ser obtida uma corrente média dentro dos valores necessários e desejáveis a operação de soldagem [1].

O uso da corrente pulsada tem possibilitado a soldagem com transferência sem curto-circuito fora da posição plana e a união de materiais de menor espessura. Entretanto, deve-se enfatizar que a seleção correta das grandezas envolvidas no processo é de fundamental importância, para que os objetivos da utilização da corrente sejam atingidos [1].

Em experimentos com arames tubulares, realizados por French e Bosworth [13], um

tipo de transferência bem estável foi conseguido, através do destacamento de uma gota por pulso [13]. Esse tipo de transferência ocorre a aproximadamente 50 J, no pulso, para arames de 1,2 mm de diâmetro e 90J para arames de 1,6 mm, sendo tais valores medidos tanto para arames com fluxo básico como para arames de núcleo sólido [13].

Conforme French e Bosworth [13], os eletrodos básicos geralmente contêm fluoretos que agem como formadores de escória, prevenindo o excesso de hidrogênio. No entanto, esses fluoretos têm um efeito adverso quanto à estabilidade do arco, particularmente à baixas correntes. Essa instabilidade causa um aumento na incidência de salpicos, como também uma transferência não axial. Utiliza-se, então, a corrente pulsada para eliminar parte desses problemas, tornando possível assim uma soldagem mais estável e econômica [13].

Ação do fluxo

Os primeiros objetivos da inclusão do fundente nestes arames são a estabilização do arco voltaico e a proteção do metal de solda contra a absorção de impurezas do ar atmosférico. Neste sentido, os diversos ingredientes presentes na composição química do fluxo são adicionados em quantidades balanceadas para garantir a estabilização do arco voltaico, a geração de vapores e de gases, a desoxidação e desnitreção, a geração de escória, a adição de elementos de liga e de pó de ferro [2].

Um fator de grande relevância na inclusão deste fundente está na possibilidade de se ampliar a uma gama de arames com a utilização de um mesmo material para a confecção da capa metálica, tendo como variação apenas o fluxo e a proteção gasosa [2].

A soldagem com o arame tubular autoprotetido, que utiliza somente a proteção do fundente interno (fluxo), em relação aos demais processos a arco voltaico, é o que apresenta os mais elevados níveis de contaminação pelo ar atmosférico. A entrada de ar promove a retenção de oxigênio e de nitrogênio na poça de fusão que podem gerar porosidade, inclusões não metálicas e provocar a degradação das propriedades mecânicas da solda [2, 15].

No arame tubular com proteção gasosa, além da proteção externa do gás, tem-se a formação gasosa em função da fusão do fluxo interno do arame, a qual proporcionará ao arco, e à poça de fusão, uma proteção parcial, evitando alguns inconvenientes que ocorrem no processo sem a proteção gasosa [2].

Ação do gás

A proteção gasosa nos processos de soldagem possui a função de proteger a poça de fusão dos elementos nocivos presente no ambiente, melhorar a estabilidade do arco, proporcionar um cordão de solda com geometria adequada e melhorar as propriedades do cordão de solda. Essa atmosfera protetora pode ser formada pela ação de um gás externo, ou por gás gerado pelo fluxo durante a soldagem, como no processo eletrodo revestido [15].

Dentre os elementos contaminantes do metal de solda, destaca-se o hidrogênio que provoca a formação de trincas; o nitrogênio, responsável pela diminuição da tenacidade da solda; e o oxigênio, em função da formação de óxidos [7].

A escolha correta do gás de proteção depende tanto dos fatores do processo como dos fatores do material. Os gases mais comuns para a soldagem pelo processo arame tubular são o CO₂ puro ou misturas de CO₂ com o Ar. As proporções mais comuns para estes gases são 80% Ar – 20% CO₂, 75 % Ar – 25% CO₂ [9].

A escolha do gás, afeta o tipo de transferência metálica predominante e as características econômicas e geométricas do cordão de solda. Quanto ao modo de transferência, o uso do CO₂ puro faz com que a transferência predominante seja por curto-circuito, devido a sua ação no balanço de forças que atuam na gota metálica na ponta do arame. Quando uma mistura de gases é usada, o modo de transferência pode ser outro, como a transferência goticular; mais comum quando se usa a mistura Ar e CO₂ com até 25% deste último [7, 20].

Quanto às características econômicas, os gases de proteção podem favorecer o aumento nas taxas de fusão e na quantidade de respingos, afetando a eficiência do processo. As características geométricas são afetadas, pois pode haver uma maior penetração, ou uma maior largura em função da escolha do gás. O CO₂ puro proporciona um aumento na penetração, já a mistura com Ar faz com que haja variação da largura e do reforço do cordão.

Lathabai e Stout [21] escreveram sobre o efeito do gás de proteção e do calor adicionado sobre a microestrutura e as propriedades mecânicas para quatro tipos de arames tubulares comerciais. Mostrou-se que o aumento de CO₂ na composição do gás de proteção (Ar/CO₂) diminui a quantidade de Mn e Si na poça de fusão, além de outros importantes elementos de liga [21]. Ao mesmo tempo, o arco torna-se instável e o nível de salpicos aumenta, aumentando também a convexidade da poça de fusão e aumentando a penetração da solda. Observações também foram feitas sobre a inconsistente tendência na temperatura de transição pelo ensaio Charpy-V, unidas à mudança da composição do gás de proteção [21].

Stenbacka [22] constatou que embora não tenha sido encontrada uma correlação direta entre o oxigênio contido no metal de solda e a resistência mecânica, ressalta-se que em um material, a diminuição da quantidade de CO₂ contida no gás de proteção e, simultaneamente, a diminuição do oxigênio no metal de solda, não acarretará obrigatoriamente no beneficiamento da temperatura de transição dúctil frágil. Esta correlação depende da dureza do metal de base que se está soldando e do calor adicionado [22].

Assim, não se pode analisar a resistência mecânica e também a microestrutura de um metal de solda com arame tubular somente pelo oxigênio contido (na ordem de 350 – 850 ppm). O estudo de Lathabai e Stout [21] mostrou que a resistência mecânica do metal de base

e o ciclo térmico junto com o nível de oxigênio e a composição química do metal de solda, controlam a microestrutura e a resistência do metal de solda [21].

Alguns pesquisadores mostraram que o aumento do Argônio contido na mistura do gás de proteção (Ar/CO₂) reduz o nível de salpicos e o reforço do cordão de solda para um arame AWS E81T1-Ni1. Reduzindo o nível de CO₂ contido na mistura diminuir-se-á o limite de escoamento e o limite de resistência e também da tenacidade. Simultaneamente, a recuperação dos elementos de liga como o C, Si, Mn e Ni aumentam com a diminuição do potencial de oxidação do gás de proteção [22].

Proteção pela geração de escória

A escória exerce uma ação físico-química sobre o metal de solda e tanto a sua quantidade como a sua natureza, influenciam na forma e no tamanho das gotas como também no aspecto final da solda [2].

Nos processos de soldagem a arco voltaico que utilizam fluxo, a efetiva proteção pela formação de escória ocorre através da decomposição do fluxo de modo que este libere constituintes, que gerem uma película contínua com fluidez capaz de envolver rápida e totalmente a gota metálica na ponta de eletrodo [2].

A fluorita (CaF₂) tem mostrado bom desempenho na redução da salpicagem. Conforme é ilustrado na Figura 11, o aumento no teor de CaF₂ na composição do fluxo reduz a viscosidade da escória [2, 23].

Os óxidos ferrosos, de titânio, de cálcio e de manganês em quantidades adequadas são também eficientes no controle da viscosidade da escória, entretanto, em menor grau que o CaF₂. Embora os fluxos a base de óxidos promovam a formação de uma barreira física para as reações gás/metalo, dependendo de sua basicidade e de sua estabilidade termodinâmica, eles também podem reagir com o metal de solda.

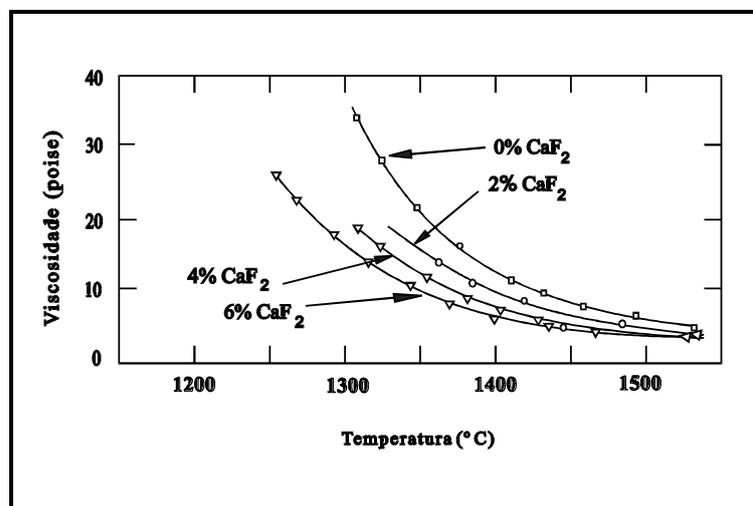


Figura 11 – Efeito da CaF_2 sobre a viscosidade da escória [2].

A proteção pela geração de escória ocorre também pela decomposição de carbonatos. Os carbonatos mais usados são: CaCO_3 , MgCO_3 , BaCO_3 , e Li_2CO_3 , com destaque para o CaCO_3 . O uso dos carbonatos de baixa temperatura de decomposição como o CaCO_3 (520 a 825°C) facilita a geração e a expansão dos gases. A 720°C a reação de decomposição do carbonato de cálcio ($\text{CaCO}_3 \longrightarrow \text{CaO} + \text{CO}_2$) se completa em uma hora, entretanto nas temperaturas do arco voltaico ela é praticamente instantânea. Nesta situação, verifica-se uma considerável redução na salpicagem [2].

Características metalúrgicas

As pesquisas sobre as características da fusão simultânea da capa metálica e do fluxo ocupam um importante lugar no estudo dos processos de fusão dos arames tubulares. A fusão de um arame tubular apresenta algumas diferenças com relação a fusão dos arames maciços. Nestes últimos, os efeitos da corrente de soldagem e, especialmente, da DBCP são mais significativos do que nos arames tubulares [2].

Medidas nos valores dos fluxos elétrico e térmico em um arame tubular, mostraram que a condutibilidade elétrica específica da mistura dispersada “metal-mineral” do arame, se reduz bastante mesmo para uma pequena proporção de componente mineral. Por outro lado, a condutibilidade térmica do fluxo se reduz com o aumento da temperatura, cresce com o aumento do tamanho das partículas e, é consideravelmente dependente da composição química tanto da parte metálica como da parte mineral. Desta maneira, a condutibilidade térmica de um arame tubular aumenta significativamente com o incremento da transferência de calor através do fluxo e da escória, afetando a sua taxa de fusão [2].

Este efeito se manifesta porque a presença do fluxo reduz o efeito Joule da capa metálica durante a passagem de corrente. A taxa de aquecimento da capa metálica, pelo arco voltaico, é então menor devido ao consumo de calor requerido para a fusão do fluxo. A área de fluxo adjacente a capa metálica fundida é um sistema discretamente não homogêneo com uma resistência térmica adicional, dependente não somente dos parâmetros geométricos mas também das propriedades térmicas desta camada superficial, da distribuição e do tamanho das gotas, da concentração dos componentes e do grau de sua interação [2]

O processo de fusão dos arames tubulares, fora a troca de calor e de massa entre o fluxo e a capa metálica, inclui também os processos de formação de escória, a evolução dos produtos gasosos e a evolução de reações químicas.

A importância de se obter bons níveis de tenacidade no metal de solda está relacionada com a diminuição, no metal depositado, de descontinuidades como fissuras, falta de fusão, falta de penetração, variação microestrutural e tensões residuais devidas aos ciclos

térmicos de soldagem. Sabe-se que a presença destas descontinuidades no metal de solda pode degenerar as suas propriedades mecânicas e, em especial, a sua tenacidade. A possibilidade de progressão de uma fissura é sempre imprevisível e, quando esta é solicitada pode provocar a rápida ruptura do componente com conseqüências muitas vezes catastróficas.

Um dos grandes problemas da utilização dos arames tubulares é a sua suscetibilidade às trincas por hidrogênio. Essa suscetibilidade se dá em função do hidrogênio absorvido durante o processo, (hidrogênio retido na solda), da zona termicamente afetada (ZAC), da microestrutura do metal de solda, da temperatura e da restrição da solda [24]. Para prevenir esse tipo de descontinuidade, utilizam-se eletrodos com baixos teores de hidrogênio, pré-aquecimento da junta soldada para se reduzir à taxa de resfriamento e permitir a difusão do hidrogênio retido e, em alguns casos, o tratamento de pós-aquecimento (TTPS) para corrigir a microestrutura e estabilizar a difusão do hidrogênio.

Em alguns estudos foi comprovado que o aumento da corrente de soldagem e uma maior umidade relativa do ar, implica em um aumento da difusibilidade do hidrogênio [24]. Observa-se que a distância bico de contato peça (DBCP) é um dos parâmetros influentes na difusibilidade do hidrogênio. Segundo Trevisan [8], o aumento dessa distância com a diminuição do aporte térmico, diminuirá a difusibilidade do mesmo na junta soldada, como pode ser observado na Figura 14.

O baixo potencial de hidrogênio que oferece o processo FCAW é significativamente importante para a soldagem dos aços de baixo e médio carbono. No entanto, nos aços de alta resistência e microligados o conteúdo de hidrogênio necessário para causar trincas assistidas por hidrogênio é inversamente proporcional à resistência do material. Significa que os aços de alta resistência e microligados podem ser susceptíveis ao fenômeno de trincamento a frio, quando soldados pelo processo FCAW [8].

Nos aços de construção de alta liga e alta resistência, o fenômeno de trincamento assistido por hidrogênio é principalmente localizado na ZAC (zona afetada pelo calor) da junta soldada. Com o desenvolvimento dos aços microligados as trincas a frio têm sido localizadas na zona fundida [8]. Isto está baseado, entre outros fatores, à maior temperatura de transformação desses aços, provocada pelo menor teor de carbono e elementos de liga em geral presentes nos aços microligados, o que faz com que a transformação autenita-ferrita da ZAC aconteça antes da total transformação da zona fundida (ZF) [8].

Analisando a microestrutura do metal soldado, observa-se que a melhor combinação de resistência e de tenacidade é obtida quando está presente no metal de solda uma microestrutura de ferrita acicular fina, aumentando a resistência à fratura por clivagem. Portanto, qualquer fator que provoque um aumento na quantidade de ferrita acicular, resulta em benefício para as propriedades da zona fundida.

Estabilidade do processo

A estabilidade do arco voltaico é um dos requisitos básicos para o bom desempenho da operação de soldagem. Ela interfere diretamente na qualidade final do metal depositado, podendo afetar a salpicagem, o consumo, a produção e o rendimento de deposição, a entrada de gás atmosférico na poça de fusão, as propriedades mecânicas do metal de solda etc.

Para uma mesma característica estática da fonte de energia, as propriedades físicas da atmosfera gasosa do arco são alguns dos pontos determinantes do seu comportamento dinâmico [25]. Deste modo, a energia de ionização, as condutibilidades elétrica e térmica bem como as suas variações com a temperatura devem ser suficientes para garantir um melhor comportamento do arco voltaico.

A estabilidade do arco geralmente é melhorada pela utilização de gás de proteção com baixo potencial de ionização. Altas temperaturas mantêm a ionização do arco dentro de um núcleo. Este núcleo é afetado pela condutividade térmica do gás, de modo que quanto maior esta condutividade, menor o diâmetro deste núcleo, resultando em maior tensão e menor estabilidade [25]. Na transferência por curto-circuito, apesar do metal praticamente não ser transferido em arco aberto (somente pelo curto-circuito), a composição do gás é capaz de afetar a duração do curto-circuito e o tamanho da gota, alterando sua estabilidade [5].

Os diversos processos de soldagem a arco apresentam entre si certas características extremamente diferentes, como por exemplo, o uso ou não de consumível, a transferência de carga elétrica e/ou de metal, o tipo de gás de proteção, o tipo de fluxo fundente, o tipo de arame (maciço ou tubular), a forma de proteção (escória e/ou gás) etc. Estas diferenças se acentuam ainda mais, com a sensível influência imposta pelas diversas condições de soldagem, tais como o tipo e o valor da corrente, o valor da tensão, da “DBCP”, a posição de soldagem, além da natureza das diferentes fontes de energia utilizadas etc. Somam-se a isso, a complexidade e a dinâmica de fenômenos elétricos, magnéticos, químicos, metalúrgicos e mecânicos que ocorrem no ambiente da soldagem, em um reduzido intervalo de tempo, e que interferem, por exemplo, na transferência de carga elétrica e de metal [25]. A somatória destes e de outros fatores dificultam a definição de um critério consensual para uma avaliação quantitativa segura da estabilidade do arco voltaico.

Além do exposto, vários autores têm estabelecido metodologias e critérios próprios que muitas vezes dificultam a interpretação e/ou a comparação de seus resultados [25]. Um dos critérios mais simples é conhecido como “critério de Khrenov”, que se baseia na medição do comprimento do arco no momento de sua extinção [93 apud 2]. Outro critério, empregado em vários trabalhos com eletrodo revestido, avalia a estabilidade pela frequência de extinções naturais do arco durante a soldagem [100, 101 apud 2]. Paton, propôs um método que avalia a estabilidade do arco em corrente alternada pela magnitude do pico da tensão de soldagem no

instante da reignição do arco [2 apud 101]. Existem outros critérios baseados na avaliação dos oscilogramas de tensão e de corrente, nas curvas “I x U”, na análise visual do arco ou no nível de ruído por ele emitido [2 apud 68].

A complexidade da análise da estabilidade do arco aumenta pela introdução da transferência metálica neste estudo. Por isso, resultados obtidos em atmosferas do processo TIG não podem ser aplicados diretamente em processos que possuem transferência metálica através do arco [15].

A estabilidade do arco em transferência por curto-circuito é afetada pelas extinções do arco. Um arco estável nesse caso é o que possui uma transferência periódica e cujo tempo de apagamento do mesmo seja o mínimo possível [15]. Isto pode ser resumido em um menor período de curto-circuito e menor tempo de transferência, com a transferência de gotas menores em uma maior frequência e maior regularidade. A Figura 12 ilustra esquematicamente os parâmetros envolvidos na transferência por curto-circuito [15].

Vários pesquisadores utilizaram um critério de estabilidade com base na análise das perturbações encontradas nos oscilogramas de tensão e corrente de soldagem. Gupta et al [26] realizaram análises estatísticas das curvas de tensão e corrente em função do tempo. Para o caso específico da transferência por curto-circuito, a estabilidade foi avaliada pela distribuição do tempo de arco aceso, assim como da frequência e do tempo de curto-circuito. Os respingos neste caso foram associados a estas variáveis, assumindo que diminuem com o aumento da indutância da fonte. Em CO_2 a geração de respingos foi maior que em $\text{Ar} + \text{CO}_2$. Isto está relacionado ao pequeno núcleo do plasma do CO_2 (alta condutividade térmica), que faz com que surja no sentido contrário à transferência de gotas, uma componente da força de Lorentz (força eletromagnética) localizada na raiz do arco [15].

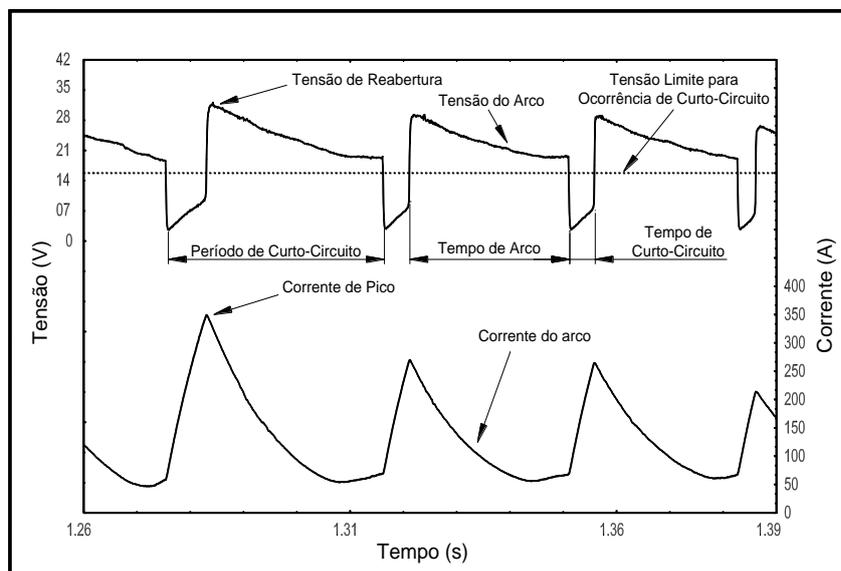


 Figura 12 – Parâmetros de transferência metálica por curto-circuito [15].

Manz [27] comparou o desempenho de diferentes tipos de construção de fontes de soldagem, que empregam ou não o controle da indutância como um recurso. As fontes com controle de indutância foram comprovadamente as mais eficientes, principalmente quando o tipo de transferência ocorria por curto-circuito. O mesmo autor, relacionou o comprimento do eletrodo transferido a cada gota (L_g) com a velocidade de alimentação do arame eletrodo (V_{alim}) e com a frequência de transferência (f) através da Equação 3 [15].

$$L_g = \frac{V_{alim}}{f} \quad (3)$$

Características econômicas

Um dos fatores de grande importância na seleção de um consumível é o seu desempenho econômico. No entanto, são muitas as variáveis que influem nesse desempenho. Destacam-se sua composição química, os parâmetros operacionais do processo de soldagem, o modo de transferência metálica etc. Quanto ao eletrodo, deve-se observar se é maciço ou tubular, seu diâmetro, o tipo de proteção etc. Dentre os parâmetros operacionais destacam-se o valor e a natureza da corrente, os valores de tensão e de DBCP [2, 12].

A taxa de fusão (TF) pode ser entendida como a quantidade de arame fundido por unidade de tempo. A taxa de fusão varia com os parâmetros acima indicados, mas principalmente com o valor da corrente usada e com o valor da distância bico de contato à peça (DBCP).

O valor da taxa de fusão pode ser obtido pela Equação 4, independente do tipo de corrente usado, se convencional ou pulsada.

$$TF = A \cdot I_m + B \cdot l_e \cdot I_{ef}^2 \quad (4)$$

Onde :

TF = taxa de fusão, kg/h;

A e B = são constantes de fusão;

I_m = valor de corrente média;

I_{ef} = valor de corrente eficaz;

l_e = comprimento do eletrodo.

A DBCP influencia o valor da taxa de fusão. Quanto maior o valor da DBCP maior será a taxa de fusão pois uma vez estabelecida a tensão de trabalho, a fonte busca manter este valor constante controlando o comprimento do arco, tanto no modo convencional como no

pulsado. Para manter o valor da tensão de trabalho, o valor da velocidade de alimentação do arame deve ser tal que tente manter o comprimento do arco o mais constante possível. Alguns estudos mostram que a velocidade de alimentação aumenta com o aumento da corrente média e o valor da DBCP.

Em uma fonte de tensão constante, quando o valor da DBCP é aumentado, para uma mesma tensão de trabalho, a tensão permanece a mesma, mas a extensão do eletrodo será aumentada. Com a passagem da corrente pelo arame, ocorre um aquecimento maior do mesmo por efeito Joule, pois a sua resistência aumenta, fazendo com que uma maior quantidade de material seja fundido, aumentando a taxa de fusão [08].

Outra característica econômica importante é a taxa de deposição (TD). Esta representa o quanto de arame fundido está sendo depositado na zona fundida por unidade de tempo. Seu valor varia diretamente com a corrente, a tensão e o tipo de gás de proteção. Para valores baixos de corrente, ocorre um maior número de salpicos, pois as gotas formadas são excessivamente grandes, contribuindo para a diminuição da taxa de deposição. O mesmo ocorre com valores altos de tensão. O tipo de gás também afeta essa característica, sendo que no caso do uso do CO₂ puro, este efeito é bastante acentuado para correntes relativamente baixas [7].

O valor da DBCP também afeta a taxa de deposição, pois se uma maior quantidade de arame está sendo fundida, uma maior quantidade de metal será também depositada na zona fundida [7].

A eficiência de deposição (ED), é a razão entre a taxa de deposição e a taxa de fusão. Seu valor é dado em porcentagem.

Parâmetros de soldagem

O ajuste dos parâmetros de soldagem em conformidade com a natureza do arame consumível é um dos fatores que dificultam a obtenção de uma boa repetibilidade para os valores da resistência ao impacto do metal de solda. Deste modo, pequenas alterações nas condições de soldagem podem causar modificações no ciclo térmico e resultar em variação microestrutural que conduza a diferentes propriedades mecânicas, especialmente nos valores de tenacidade [2, 15].

É essencial um rigoroso controle do procedimento de soldagem e isto requer um conhecimento detalhado da importância relativa das variáveis do processo tais como a distância bico de contato peça (DBCP), a tensão, a corrente e a velocidade de soldagem. A seguir será feita uma abordagem sobre a importância destes parâmetros de soldagem.

DBCP

A DBCP é um parâmetro de grande importância, que tem efeitos significativos

sobre a soldagem com arame tubular. A passagem da corrente através do arame produz um pré-aquecimento por efeito Joule. Isto intensifica a geração de gás e de vapor de uma forma mais ativa durante a soldagem [6, 15].

Mantendo-se as demais condições, a redução deste parâmetro aumenta a corrente de soldagem. Uma excessiva DBCP contribui para a redução da tensão de soldagem, o aumento da instabilidade do arco, a intensificação da salpicagem e para a geração de porosidade no metal depositado. A possibilidade de soldagem com grandes valores de DBCP, por outro lado, facilita a visibilidade na soldagem em juntas de difícil acesso.

A Figura 13 mostra o efeito da DBCP sobre o teor de nitrogênio no metal de solda de um arame tubular [6]. Através desta figura, vê-se que, mantidas as demais condições de soldagem, o aumento da DBCP aumenta o teor de nitrogênio no metal de solda.

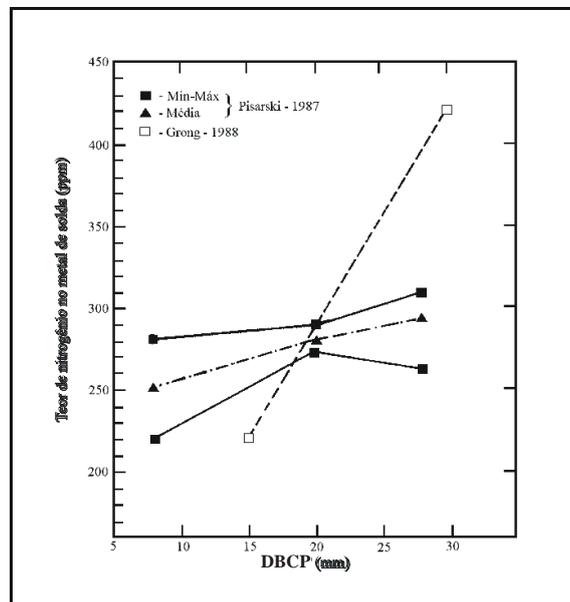


Figura 13 – Efeito da DBCP sobre o teor de nitrogênio [6].

O efeito da DBCP sobre a difusão do hidrogênio no metal de solda pode ser observado na Figura 14, para diferentes níveis de aporte térmico e na Figura 15, para diferentes valores da intensidade de corrente.

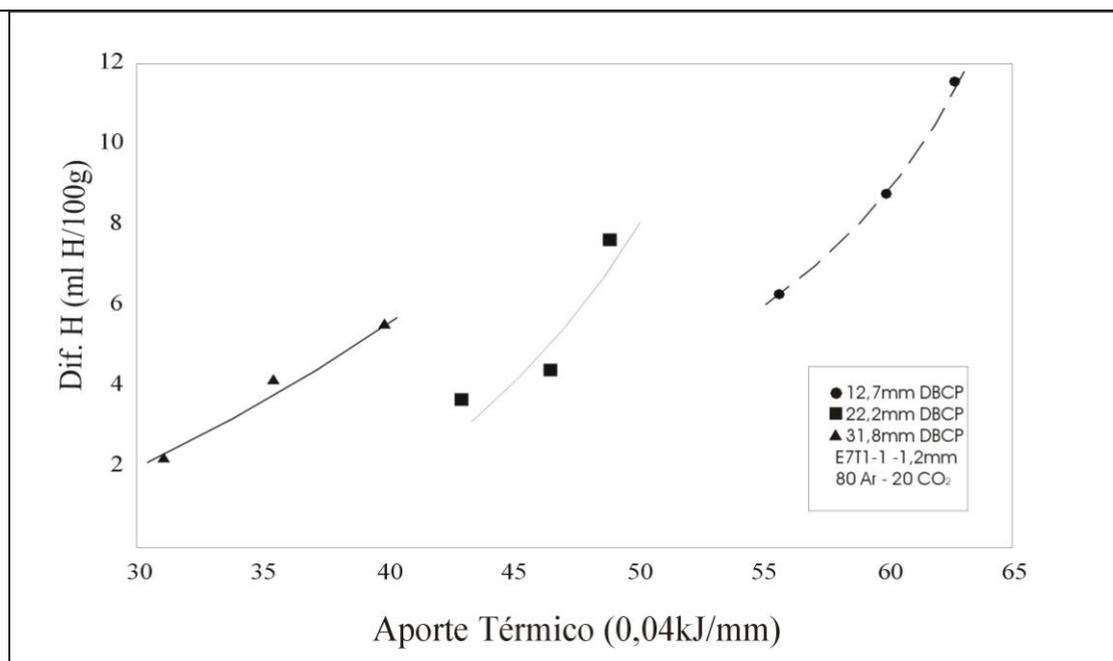


Figura 14 – Efeito do aporte térmico e da DBCP sobre a difusão do hidrogênio na solda [24].

Tensão de soldagem

A tensão de soldagem tem relação direta com a estabilidade e com o comprimento do arco e isto afeta consideravelmente os teores de nitrogênio no metal de solda. Durante a soldagem a arame tubular recomenda-se o uso de um comprimento de arco o mais constante possível. Embora esta necessidade seja satisfeita em condições ideais de laboratório, na prática industrial, a sua obtenção ocorre com alguma dificuldade [2, 15].

Corrente de soldagem

A corrente de soldagem afeta principalmente a transferência metálica e a proteção do metal fundido. O aumento da corrente acelera a transferência metálica, reduz o tamanho das gotas, intensifica a vaporização dos ingredientes do fluxo e a proteção gasosa ao arco. Isto leva a uma menor contaminação pelo nitrogênio, minimizando a formação de porosidade e o prejuízo das propriedades mecânicas [2, 7, 15].

Segundo Pokhodnya [23], com o aumento da intensidade de corrente, a quantidade de nitrogênio na gota metálica diminui mesmo com a elevação da tensão de soldagem.

Segundo Harwig et al [24], a difusibilidade do hidrogênio está associada com a corrente de soldagem. A difusão do hidrogênio contido no metal de solda cresce aproximadamente linear com a corrente de soldagem. Aumentando a DBCP, diminuirá a corrente e assim também será diminuída a difusibilidade do hidrogênio contido, para fonte de tensão constante.

A Figura 15 mostra a relação existente entre a corrente e a difusão do hidrogênio para três níveis de DBCP. Pode-se verificar que quanto maior a corrente de soldagem maior é a difusão do hidrogênio independente do valor da DBCP.

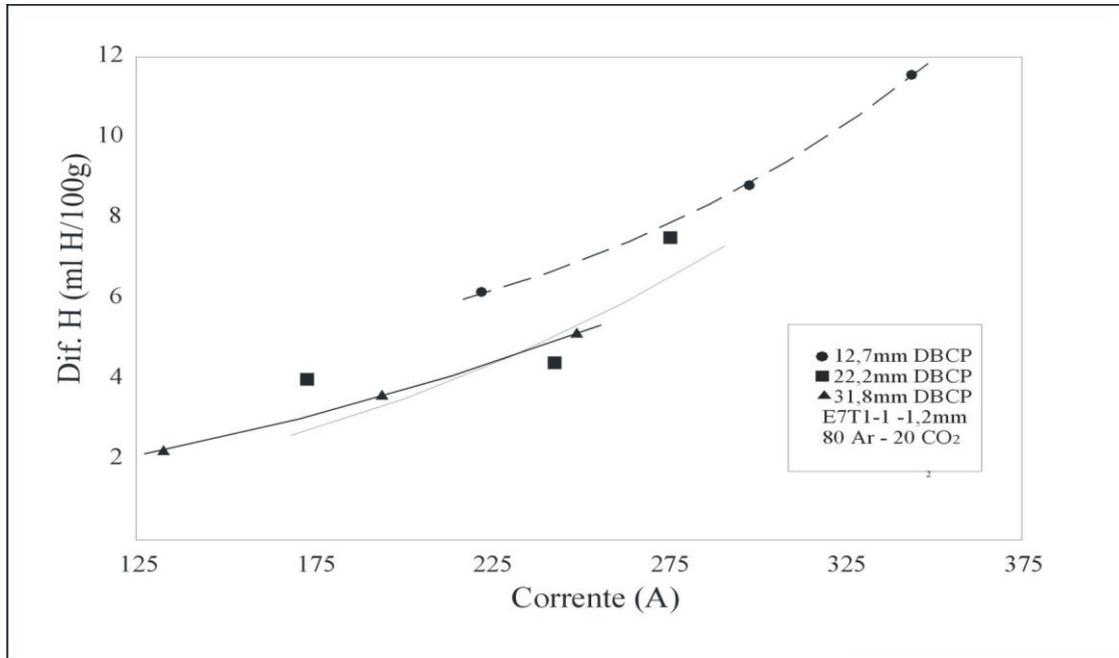


Figura 15 – Efeito da corrente sobre a difusão do hidrogênio para um eletrodo E71T-1 [24].

Velocidade de soldagem

Alguns pesquisadores concluíram que a velocidade de soldagem é um dos parâmetros que apresenta as maiores influências no controle da tenacidade do metal de solda [2]. Esta variável afeta as reações metalúrgicas envolvendo o metal líquido. Uma velocidade de soldagem muito baixa promove o aumento do volume da poça de fusão e uma maior facilidade para a sua contaminação pelo nitrogênio. Um valor muito elevado nesta velocidade não permite no entanto, a intensificação das reações metalúrgicas de modo a complementar o processo de desnitreção. Neste caso, verifica-se também o aumento do teor de nitrogênio livre no metal de solda [2].

Área adicionada

Como discutido anteriormente, a velocidade de soldagem influencia de forma direta na tenacidade do metal de solda após a soldagem, devido à quantidade de nitrogênio existente no metal fundido. Para uma fonte de soldagem do tipo tensão constante, o uso de um sistema sinérgico é fundamental para a regulagem de forma rápida. Como forma de relacionar a velocidade de soldagem com a de alimentação do arame, foi definida a idéia da área adicionada. A área adicionada é a forma indireta para medir o volume da poça de fusão (a área adicionada pode ser relacionada com o volume por unidade de comprimento). Desta forma a

seleção da área adicionada em determinado nível, tem a finalidade principal de manter aproximadamente o mesmo comprimento de eletrodo (em fontes de tensão constante) para uma tensão específica, pois procura-se estudar a transferência metálica e associá-la a estabilidade. Quando se têm valores diferentes da área adicionada para uma dada tensão, a DBCP real se altera e o comprimento do eletrodo também. Esta idéia tenta quantificar o volume de metal adicionado ao metal base. Para uma soldagem ser realizada com êxito, é necessário que exista uma uniformidade da seção do cordão de solda ao longo de seu comprimento. Fixando o valor dessa relação, podemos controlar o sistema de alimentação em função do valor da velocidade de soldagem, com estas variando inversamente [15].

O valor dessa área adicionada é determinado pela Equação 5. Esta relação pode ser obtida por deduções simples entre as velocidades de alimentação do arame e a taxa de fusão, considerando um rendimento igual a 1 [15].

$$S_{ad} \sim \frac{V_a}{V_s} \quad (5)$$

Onde :

V_a = velocidade de alimentação do arame, em m/min;

V_s = velocidade de soldagem, m/min.

CAPÍTULO III

materiais e métodos

Todo o procedimento de montagem da bancada experimental, seqüência de execução dos ensaios, assim como a descrição dos equipamentos, dos acessórios, dos materiais de consumo empregados e dos parâmetros de soldagem avaliados, são detalhados neste capítulo. O objetivo deste é transmitir todas as informações necessárias de forma que o leitor compreenda e consiga, caso necessite, reproduzir as condições de ensaios.

Equipamentos e Materiais

Os ensaios foram realizados usando como metal base o aço ABNT 1020 nas dimensões de 150 x 50 x 8 mm, empregando uma fonte eletrônica multiprocesso, com tocha de soldagem tendo deslocamento promovido por um posicionador eletrônico linear. Como consumível foi utilizado o arame tubular para soldagem com proteção gasosa pertencente a classe AWS E 71T-1, com 1,2 mm de diâmetro. Os gases de proteção usados neste trabalho foram a mistura de 25% de CO₂ e 75% de Argônio, e CO₂ puro.

Fonte de soldagem

Foi empregada uma fonte eletrônica multiprocesso que pode ser operada nos processos MIG/MAG, arame tubular, eletrodo revestido, TIG e plasma (Figura 16). A mesma possui um controle eletrônico independente de efeito indutivo de subida e de descida. Os seus dados técnicos estão abaixo descritos [15].

Tipo: Fonte eletrônica chaveada no secundário

Modelo: INVERSAL 300

Fabricante: IML/LABSOLDA-UFSC

Corrente: contínua/alternada (constante ou pulsada)

Corrente nominal: 300 A

Corrente máxima: 450 A

Tensão: 220, 380 ou 440 V, trifásica

Potência máxima consumida: 12 kW

Fator de potência: 0,94

Tocha refrigerada a água

É responsável pela condução do arame e do gás de proteção até a poça de fusão e também do contato elétrico no bico de contato (Figura 17) [15].

Modelo: 501MBKD3M

Fabricante: BINZEL

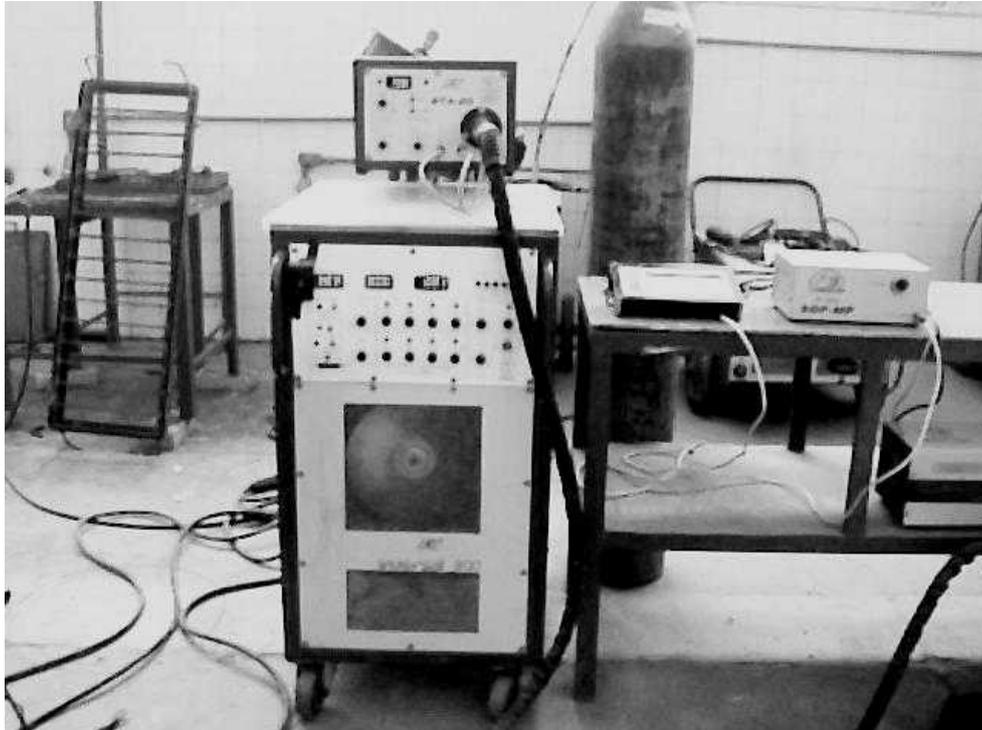


Figura 16 – Fonte de soldagem [10].

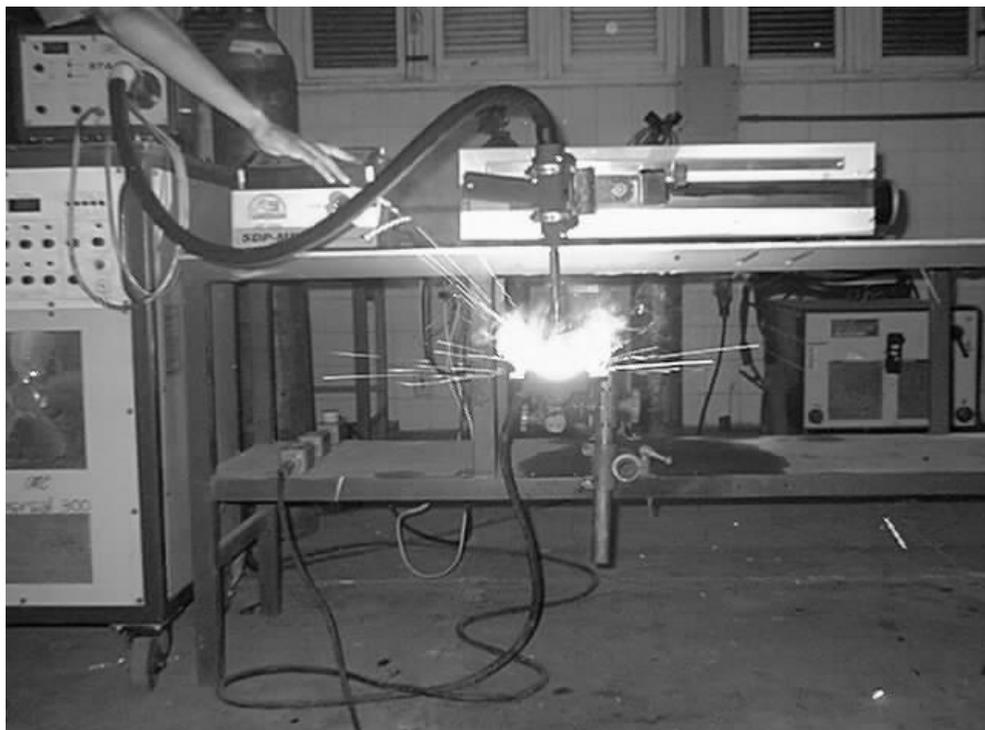


Figura 17 – Processo operando com tocha de soldagem para Arame Tubular [10].

Posicionador eletrônico da tocha de soldagem

Este posicionador regula a velocidade de soldagem e a posição inicial e final do cordão de solda (Figura 17).

Fabricante : IML/LABSOLDA-UFSC

Modelo: SDP-MP

Sistema de alimentação de arame

É próprio da fonte de soldagem INVERSAL300. Apresenta um controle adequado e robusto necessários para realização dos ensaios deste trabalho.

Modelo: STA - 20/digital

Fabricante: IML/LABSOLDA-UFSC

Caixa de medição

É responsável pelas medidas de tempo de soldagem, comprimento do arame consumido na soldagem e velocidade instantânea de alimentação do arame.

Fabricante: IML/LABSOLDA-UFSC

Equipamentos para ensaios metalográficos

Serra alternativa

Lixadeira rotativa – Kunth Rotor - Struers

Microscópio ótico Jenaplan – Zeiss

Estereomicroscópio GSZ – Askamania

Sistema de aquisição de dados

O sinal de corrente foi obtido por um sensor hall de 500 A, que faz a leitura dos valores da corrente de soldagem. O sinal de tensão foi obtido através de um voltímetro. Ambos os sensores enviam um sinal proporcional à corrente e a tensão para a placa de aquisição.

A placa de aquisição empregada foi a INTERDADTA II fabricada pelo LABSOLDA da Universidade Federal de Santa Catarina, cuja frequência de aquisição é variável em função do tipo de computador. Apresenta um conversor analógico/digital com 16 canais com faixas de

medidas de tensão de 0 a 10V e -10 a +10V. A leitura pode ser feita em 8 ou 12 bits, a qual é realizada pelo JSMIG (um “software” que será descrito mais adiante). A placa de aquisição foi instalada em um microcomputador com processador Pentium 133 MHz e 16 MB de RAM. As resoluções da placa para a caixa de medição utilizada são ilustradas na Tabela 2.

Tabela 2 – Resolução da placa de aquisição Interdata II

Aquisição	Corrente (A)	Tensão (V)
8 bit	4,0	0,9
12 bit	0,3	0,06

Uma vez que os sinais de tensão e corrente, lidos diretamente do arco, são incompatíveis com o conversor A/D da placa de aquisição, torna-se necessário as suas compatibilizações. Estas por sua vez, são feitas através da “caixa de medição”. Ela é constituída de duas placas, onde uma serve para a atenuação de sinal de tensão, com entrada de -110 V a + 110 V e com saída de -10 V a + 10 V, e a outra, serve para amplificação do sinal de corrente, com entrada de -100 mV a 100 mV para proporcionar um sinal de saída de -10 V a +10 V.

Os sinais convertidos pela caixa de medição entram na placa de aquisição e são submetidos a conversão e tratamento através de softwares específicos tais como o JSMIG, o CONVER e o ANALISER [11].

O JSMIG tem como função criar a interface apropriada com a placa de aquisição para que se possa adquirir e fazer uma análise prévia dos dados. Várias informações dos parâmetros de soldagem podem ser armazenadas e associadas aos sinais elétricos de corrente e tensão do arco. Também é possível obter gráficos de tensão, corrente, resistência, potência do arco em função do tempo. Os sinais de saída podem ser fornecidos em valores médios e eficazes, com o desvio padrão relacionado [15].

O CONVER faz a conversão e/ou fragmentação de dados obtidos no JSMIG para os arquivos compatíveis aos programas ANALISER e aos softwares comerciais de estatística. O objetivo da fragmentação é gerar vários arquivos em ASCII para a utilização posterior em aplicativos de análise estatística e de geração de gráficos [11].

O ANALISER é o programa responsável pelo tratamento quantitativo e estatístico dos dados, e que fornece as variáveis indicativas da estabilidade do arco. As variáveis obtidas (a partir dos valores instantâneos de corrente e tensão) em corrente contínua (CC) por este programa são [11]:

- a tensão média (U), o seu desvio padrão (σ_U) e o desvio padrão relativo (σ_U/U);
- a corrente média (I), o seu desvio padrão (σ_I) e o desvio padrão relativo (σ_I/I);
- a tensão eficaz (U_{ef});

- a corrente eficaz (I_{ef});
- o período médio de transferência (T), o seu desvio padrão (σ_T) e o desvio padrão relativo (σ_T/T);
- o tempo médio de curto-circuito (t_{cc}), o seu desvio padrão (σ_{tcc}) e o desvio padrão relativo (σ_{tcc}/t_{cc});
- a tensão média de reabertura após o curto circuito (U_1), o seu desvio padrão (σ_{U_1}) e o desvio padrão relativo (σ_{U_1}/U_1);
- o tempo médio de reabertura (t_1), o seu desvio padrão (σ_{t_1}) e o desvio padrão relativo (σ_{t_1}/t_1);
- a corrente média de reabertura (I_1), o seu desvio padrão (σ_{I_1}) e o desvio padrão relativo (σ_{I_1}/I_1);

Os valores destas variáveis podem ser impressos, gravados em arquivos texto ou em arquivos ASCII, o que irá depender do usuário.

No entanto, para utilizar este “software” corretamente na análise em CC, existe a necessidade da especificação da tensão de referência para o curto-circuito (U_r). A mesma é definida como sendo a tensão ajustada pelo usuário, abaixo da qual, o “software” considera a ocorrência de curto-circuito. Neste trabalho, utilizou-se $U_r = 10$ V, que foi obtido pela análise qualitativa dos oscilogramas da tensão do arco [11,12]. Além da tensão de referência de ocorrência de curto-circuito, adotou-se 0,0020s para o tempo mínimo de curto-circuito com transferência da gota (t_{min}). Assumiu-se ainda que os curtos-circuitos com duração inferior a 2,0ms seriam considerados como circuitos aleatórios e, portanto, não representavam transferência de gotas.

Com os dados finais obtidos do ANALISER, é utilizado um software comercial que realiza um tratamento estatístico das variáveis selecionadas e realiza a plotagem dos gráficos dos seus efeitos sobre as características operacionais e econômicas do processo [15]. O tratamento estatístico empregado foi a análise de variância (NOVA) com índice de significância de 95%.

Metodologia

Os corpos de prova de aço ABNT 1020 com seção 50 X 8 mm, e 150 mm de comprimento foram obtidos a partir de uma barra chata. Após essa operação de corte dos corpos de prova foi feito um esmerilhamento para a limpeza da superfície a ser soldada.

Cada corpo de prova foi pesado antes de iniciar-se o processo de soldagem. Foram feitas soldagens de simples deposição na posição plana em 36 corpos de prova empregando corrente pulsada (fonte no modo corrente constante) e 36 corpos de prova empregando

corrente convencional (fonte no modo tensão constante).

As soldagens foram todas automatizadas através de um movimento linear da tocha de soldagem, comandado eletronicamente. As aquisições dos valores instantâneo de tensão e corrente foram realizadas em 12 bits com frequência de 10 kHz com duração de 6 segundos, em três repetições, totalizando 18 segundos de aquisição para cada condição de soldagem.

A soldagem foi dividida em duas etapas. Na primeira etapa empregou-se o processo convencional (tensão constante), e na segunda, realizou-se a soldagem com imposição de corrente, no modo corrente pulsada. Os níveis de corrente eficaz empregados para o processo convencional foram os mesmos do processo com pulsação de corrente.

Alinhamento e nivelamento do suporte e do posicionador de soldagem

Os corpos de prova foram colocados em um suporte que permite ajuste em sua posição. O alinhamento dos mesmos foi executado para garantir uma concordância do deslocamento da tocha com a superfície do metal base, e o nivelamento para manter a mesma distância entre o bico de contato e a peça ao longo de toda a soldagem. Para isso, foram utilizados, um gabarito para soldagem e um esquadro combinado com marcador de nível.

No alinhamento, ajustava-se a ponta do eletrodo com o eixo longitudinal do corpo de prova e deslocava-se a tocha através do posicionador ao longo de todo comprimento do corpo de prova, verificando-se e ajustando-se o posicionador para se obter o resultado desejado.

No nivelamento, a distância entre a ponta do eletrodo e a superfície era verificada em uma extremidade do corpo de prova para ser comparada com a distância da outra extremidade. Os ajustes no suporte foram feitos seguindo sempre esta seqüência até que não houvesse mais diferenças [15].

Parâmetros de soldagem

A tocha foi posicionada com 90° em relação ao plano da superfície do corpo de prova. A distância bico de contato peça – DBCP - foi regulada em 20 mm e 25 mm. Nivelou-se o suporte da chapa e a seguir ajustou-se o ângulo da tocha a 90° da superfície do corpo de prova tanto em relação ao eixo longitudinal como transversal do suporte. Os instrumentos utilizados nestes ajustes foram esquadro combinado com marcador de nível e paquímetro.

Os demais parâmetros de soldagem e os níveis dos fatores de controle foram determinados a partir de testes preliminares. Esses parâmetros de soldagem adotados podem ser vistos abaixo nas Tabelas 3.e 4.

Foram feitas 03 (três) repetições para cada condição de soldagem, totalizando 72 corpos de prova.

Tabela 3 – Parâmetros de soldagem no Processo Convencional.

Corrente Eficaz Desejada (A)	160	180	200	3 níveis
DBCP (mm)	20	25		2 níveis
Gás	CO ₂	Ar+25%CO ₂		2 níveis

A vazão do gás utilizada para todos os corpos de prova ensaiados foi de 14 l/min.

Tabela 4 – Parâmetros de soldagem no Processo Pulsado.

Corrente Eficaz Desejada (A)	160	180	200	3 níveis
DBCP (mm)	20	25		2 níveis
Gás	CO ₂	Ar+25%CO ₂		2 níveis

A Tabela 5 mostra os parâmetros de pulsação utilizados durante o processo pulsado para cada nível de corrente.

Tabela 5 – Valores de pulso e de base para corrente e tempo (Processo Pulsado).

Corrente desejada-I (A)	Corrente de pulso - I _p (A)	Corrente de base - I _b (A)	Tempo de pulso- t _p (ms)	Tempo de base - t _b (ms)
160	260	60	2,0	3,4
180	260	80	2,0	2,7
200	260	100	2,0	2,2

Os valores das velocidades de alimentação do arame (m/min) são dados na Tabela 6 para o processo convencional e na Tabela 14 para o processo pulsado.

Em todos os experimentos procurou-se manter a relação va/vs entre 20 e 23 para garantir uma área adicionada aproximadamente constante.

Critérios de avaliação

Para cada tipo de corrente (convencional ou pulsada) foram analisados os efeitos do tipo de gás de proteção, da corrente de soldagem e da DBCP sobre o desempenho do processo a arame tubular. Como critério de avaliação foram adotadas a estabilidade do arco, as características econômicas do arame e a geometria do cordão de solda.

a) Estabilidade do arco - avaliada a partir dos valores médios do tempo de curto-circuito (t_{cc}) e frequência de curto-circuito (F_{cc}).

b) Características econômicas do arame - avaliadas a partir dos valores da taxa de fusão (TF), taxa de deposição (TD) e eficiência de deposição (ED).

c) Características geométricas do cordão de solda - avaliadas a partir da largura (B), penetração (P) e reforço (R) do cordão de solda.

CAPÍTULO IV

Resultados e discussão

Primeira etapa (soldagem no modo tensão constante - convencional)

A Tabela 6 apresenta os valores médios de tensão e os valores médios e eficazes de corrente, obtidos na realização dos ensaios. A última coluna à direita da tabela, mostra os valores obtidos para as relações V_a/V_s .

Tabela 6 – Parâmetros de soldagem para o processo convencional.

Gás	DBCP (mm)	I_{ef} (A)	I_m (A)	U_m (V)	v_a (m.min ⁻¹)	v_s (m.min ⁻¹)	Razão v_a/v_s
CO ₂ + Ar	20	161	160	23	5,4	0,24	22
		180	177	23	6,3	0,28	22
		203	200	23	7,9	0,34	23
	25	160	159	23	6,4	0,28	22
		182	179	23	7,8	0,34	23
		200	194	23	9,3	0,40	23
CO ₂	20	161	160	23	5,7	0,24	23
		182	181	24	7,3	0,31	23
		201	199	24	8,7	0,37	23
	25	160	160	23	7,1	0,29	24
		183	174	24	8,2	0,36	23
		199	192	24	10,2	0,43	23

Estudo da estabilidade do arco

A Tabela 7 indica a percentagem de curtos-circuitos com transferência metálica ($t_{cc} > 2,0$ ms) para os ensaios realizados. Nota-se nitidamente que para os dois níveis de DBCP a soldagem com o CO₂ puro provoca um aumento considerável na percentagem de curtos-circuitos com transferência metálica.

Tabela 7 – Percentagem de curtos-circuitos com transferência metálica ($t_{cc} > 2,0$ ms).

Tipo de Corrente	Gás	DBCP (mm)	Corrente		
			160 A	180 A	200 A
Convencional	Ar + CO ₂	20	4,0%	15,6%	23,5%
		25	34,8%	49,9%	51,7%
	CO ₂	20	25,4%	58,8%	64,8%
		25	75,5%	82,5%	72,4%

As Figuras 18 e 19 mostram os histogramas dos tempos de curtos-circuitos respectivamente para a mistura de Ar + CO₂ e para o CO₂ puro. Analisando o histograma da Figura 18 observa-se que a grande incidência dos curtos-circuitos na soldagem com Ar + CO₂ ocorreu em um intervalo de tempo menor que 2,0 ms, caracterizando curtos-circuitos sem transferência metálica. Já na Figura 19 observa-se que a grande incidência dos curtos-circuitos, na soldagem com CO₂ ocorreu em intervalos de tempo acima de 2,0 ms, caracterizando a predominância de curtos-circuitos com transferência metálica, demonstrando

que o tipo de gás influenciou o modo de transferência metálica.

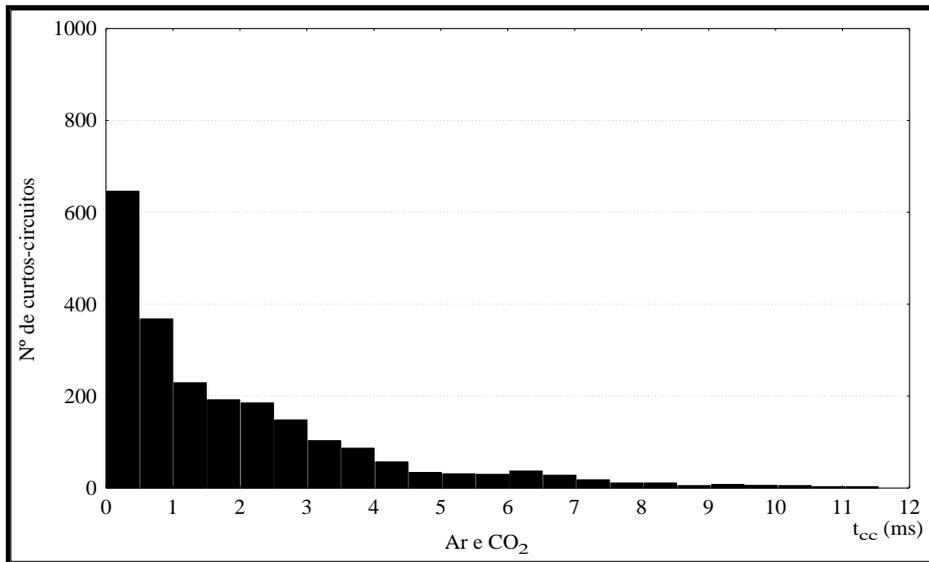


Figura 18 – Histograma dos curtos-circuitos para o processo convencional com Ar + CO_2 .

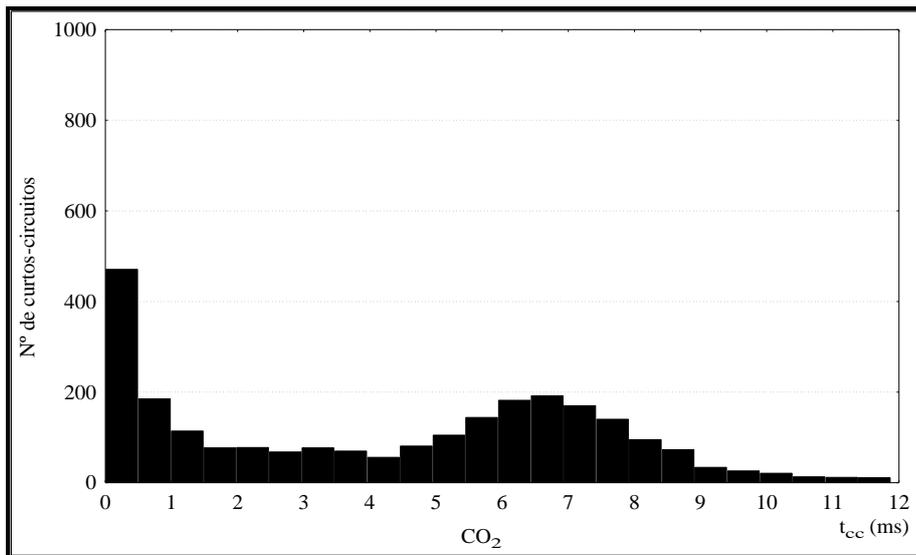


Figura 19 – Histograma dos curtos-circuitos para o processo convencional com CO_2 .

Nas Figuras 20 e 21 pode-se observar trechos dos oscilogramas de tensão e corrente para as soldagens utilizando mistura de Ar e CO_2 e CO_2 puro, respectivamente. Analisando-se a Figura 20 observa-se que a incidência de curtos-circuitos é bem menor quando comparado ao oscilograma da Figura 21, caracterizando-se por curtos-circuitos de pequeno tempo de duração. Já a Figura 21 apresenta os oscilogramas com uma incidência de curtos-circuitos bem acima da anterior e com tempos bem maiores. Através dessas observações pode-se supor que as gotas transferidas na soldagem com a mistura de Ar + CO_2 são menores que as gotas transferidas na soldagem com CO_2 puro. Isso pode ser benéfico em

função da menor salpicagem e do menor tempo de arco apagado, o que resulta no aumento de sua estabilidade.

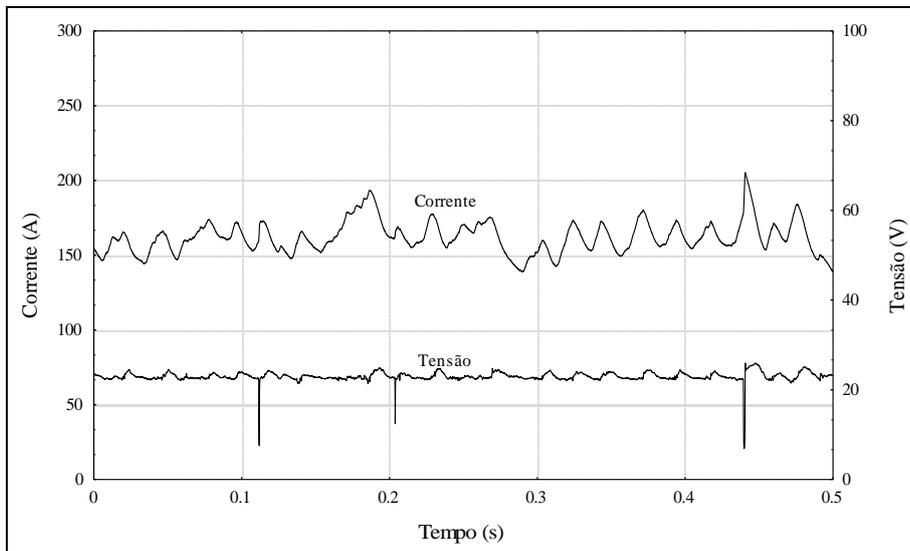


Figura 20 – Oscilograma para DBCP de 20 mm, usando Ar + CO₂, I_{ef}=160 A.

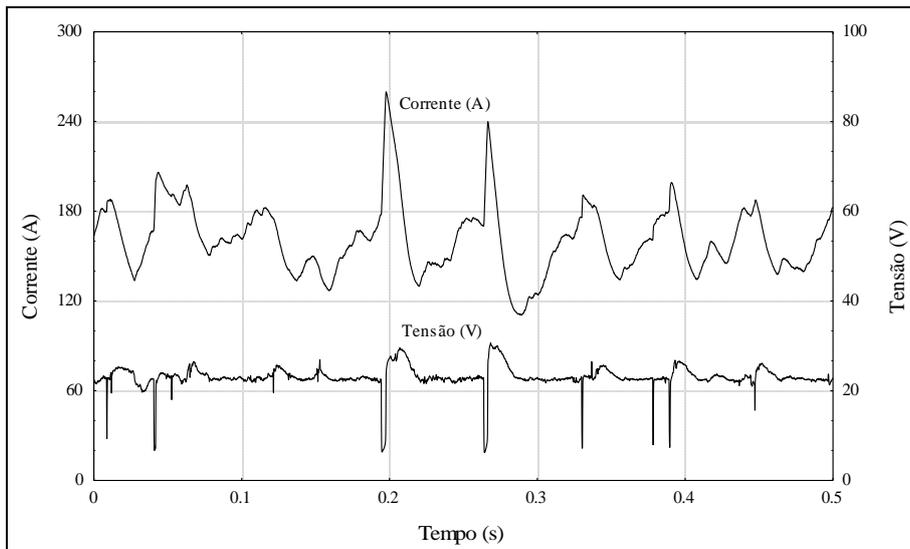


Figura 21 – Oscilograma para DBCP de 20 mm, usando CO₂, I_{ef}=160 A.

Esse comportamento é mais facilmente verificado quando se utiliza a análise estatística dos índices de estabilidade, frequência de curto-circuito (F_{cc}) e tempo de curto-circuito (t_{cc}).

Para a avaliação do efeito dos fatores selecionados, sobre os diversos índices empregados para mensurar o desempenho operacional do processo, utilizou-se a ferramenta estatística análise de variância (ANOVA) adotando-se $\alpha = 5,0\%$, onde α é o índice ou nível de significância. Logo, sempre que $\alpha \leq 5,0\%$ considera-se que o fator em questão afeta,

estatisticamente, os índices indicadores da estabilidade do arco, das características econômicas do arame e da geometria da solda.

A Tabela 8 apresenta os valores médios das frequências de curto-circuito e tempos de curto-circuito, para os ensaios realizados.

Tabela 8 – Resultados da análise de estabilidade (processo convencional).

Tipo de gás	DBCP (mm)	Corrente (A)	F _{cc} (Hz)	t _{cc} (ms)
CO ₂ + Ar	20	161	5,5	0,68
		180	15,22	0,98
		203	27,61	1,30
	25	160	17,55	1,53
		182	27,61	2,31
		200	31,22	2,99
CO ₂	20	161	13,28	1,30
		182	23,72	3,53
		201	29,83	4,21
	25	160	22,95	4,58
		183	24,22	5,82
		199	26,17	5,45

Observando-se a Tabela 9 verifica-se que todos os fatores analisados tiveram influência em pelo menos um dos índices de estabilidade. Constata-se ainda, na Tabela 9, que o efeito da corrente sobre o índice F_{cc} depende da DBCP. Analisando as Figuras 22 a 27 pode-se verificar essas influências. A mudança do CO₂ puro para a mistura de CO₂ e argônio reduz o tempo médio de curtos-circuitos (Figura 22). Esta redução proporciona uma melhoria acentuada na estabilidade do arco. Com essa minimização dos tempos dos curtos-circuitos tem-se aí um menor tempo de arco apagado, promovendo assim maior estabilidade ao processo.

Tabela 9 – Análise de variância (ANOVA) para as características de estabilidade.

Fator	Fator α (%)	
	Estabilidade do arco	
	F _{cc}	t _{cc}
1 – Gás	36,12	0,00
2 – DBCP	1 2,64	0,16
3 – I _{ef}	2 0,00	11,54
Interação – 1 x 2	3 13,2 9	9,97
Interação – 1 x 3	4 15,1 9	41,99
Interação – 2 x 3	5 0,36	88,44

Tal efeito era esperado já que o tipo de transferência na soldagem com o gás de

proteção CO_2 puro é basicamente por curto-circuito, caracterizado por tempos de curtos-circuitos com valores acima de 2,0 ms, o que já não acontece com a soldagem utilizando a mistura gasosa Ar + CO_2 . Como visto na Tabela 9, a frequência de curto-circuito não foi afetada pela mudança do gás, sendo assim, o índice t_{cc} passa a ser o índice básico para a análise da estabilidade com a mudança do gás de proteção, em função de ser o único que sofreu influencia com a mudança do gás.

Com uma análise mais apurada da Figura 22, verifica-se que o valor médio de t_{cc} para a soldagem com a mistura Ar + CO_2 é de aproximadamente 1,5 ms. Já para a soldagem com o CO_2 puro esse valor salta para níveis acima de 4,0 ms, vindo a confirmar o que foi mencionado anteriormente.

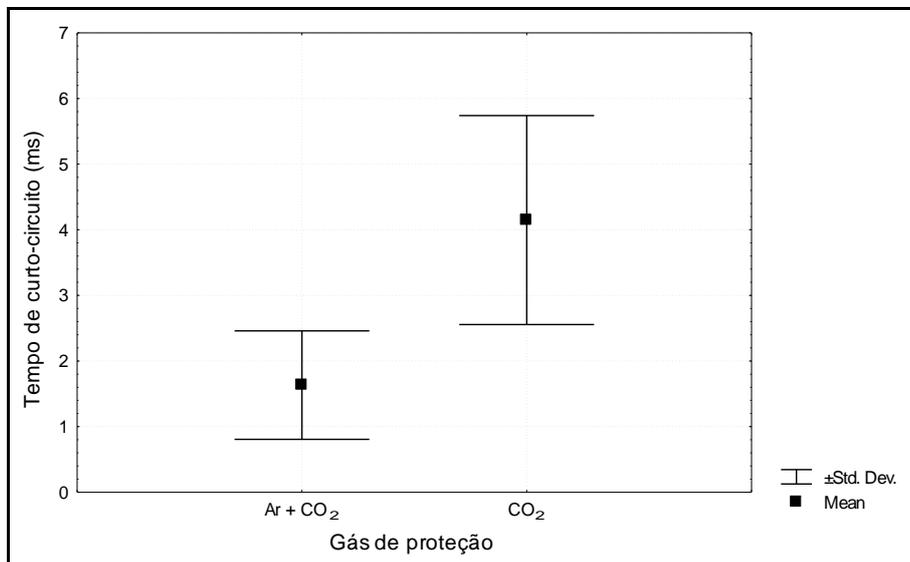


Figura 22 – Influência do gás de proteção sobre t_{cc} .

Com relação a distância bico de contato peça (DBCP), nas Figuras 23 e 24 pode-se observar a sua influência sobre os índices F_{cc} e t_{cc} . Na Figura 23, constata-se que quanto maior for o valor da DBCP maior será o valor de F_{cc} . Com o aumento da DBCP tem-se um maior comprimento de eletrodo livre, com essa maior extensão livre de arame a tendência é de se aumentar o efeito Joule e, conseqüentemente, tem-se um maior aquecimento na extremidade livre do arame. Esse aquecimento provoca uma aceleração na formação e destacamento da gota metálica gerada na extremidade do arame. Com a soldagem sendo efetuada com os mesmos níveis de tensão e para o mesmo eletrodo, as variações geradas pela mudança da DBCP podem causar mudanças nos valores de F_{cc} e t_{cc} e, conseqüentemente, na estabilidade do processo em questão.

Na Figura 24 observa-se que o aumento no valor da DBCP de 20 mm para 25 mm aumenta também o valor de t_{cc} médio, que variou de valores na faixa de 2,0 ms para valores na

ordem de 4,0 ms. Com isso pode-se afirmar que para os níveis analisados, o aumento da DBCP provoca uma alteração na instabilidade do arco, pois, aumenta-se também F_{cc} e t_{cc} , os quais influenciarão diretamente o tempo de arco apagado.

Com relação à corrente de soldagem, pela Tabela 9 observa-se que esse parâmetro afetou diretamente a frequência de curto circuito F_{cc} ($\alpha = 0,00$). Através da análise da Figura 25 verifica-se que quanto maior for sua intensidade maior será F_{cc} . O efeito mais generalizado poderá ser observado também na Figura 26. Observando essa figura, verifica-se que o efeito da corrente sobre F_{cc} é menor para valores de DBCP maiores e proteção com CO_2 puro. De uma maneira geral o tempo de curto circuito t_{cc} não foi afetado pela variação nos níveis de corrente, entretanto, observando a Figura 27, verifica-se que para a soldagem com a mistura Ar + CO_2 e níveis de DBCP mais elevados, a variação da corrente provoca um efeito acentuado em t_{cc} . O mesmo acontece para a proteção com CO_2 puro e menor nível de DBCP. Tais fatores podem estar ligados às características de cada gás de proteção. Na soldagem com a mistura Ar + CO_2 a transferência metálica é basicamente por voo livre, entretanto, com valores de DBCP maiores, tem-se um maior aquecimento na extremidade do arame. Acredita-se que com esse aumento de energia gerada pelo efeito Joule, a variação na intensidade de corrente passe a ser influente sobre t_{cc} , pois se tem acrescido ao efeito da DBCP, o efeito da variação de energia gerada pela variação da intensidade de corrente.

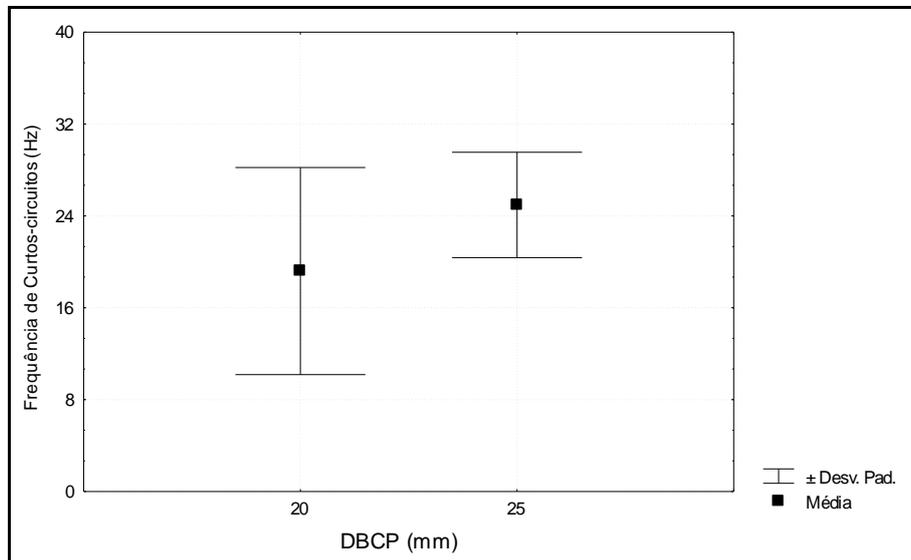


Figura 23 – Influência da DBCP sobre F_{cc} .

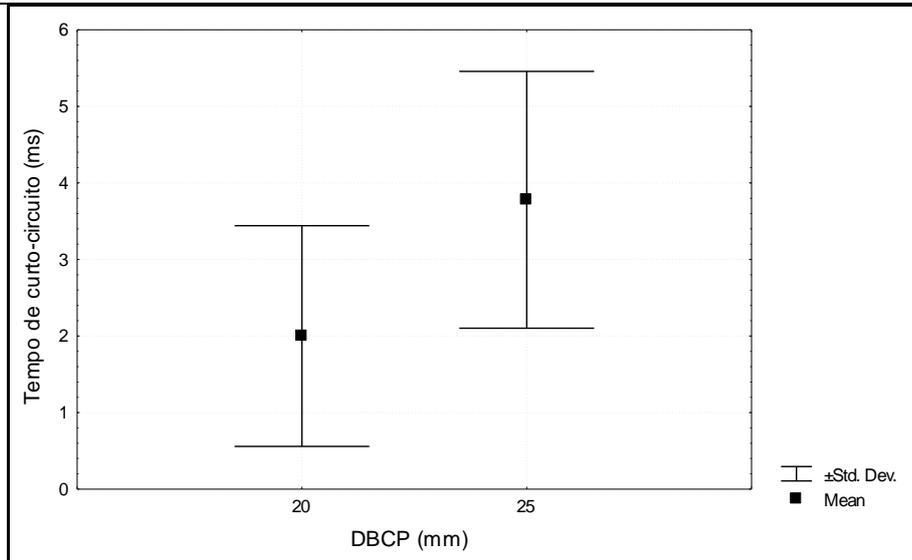


Figura 24 – Influência da DBCP sobre t_{cc} .

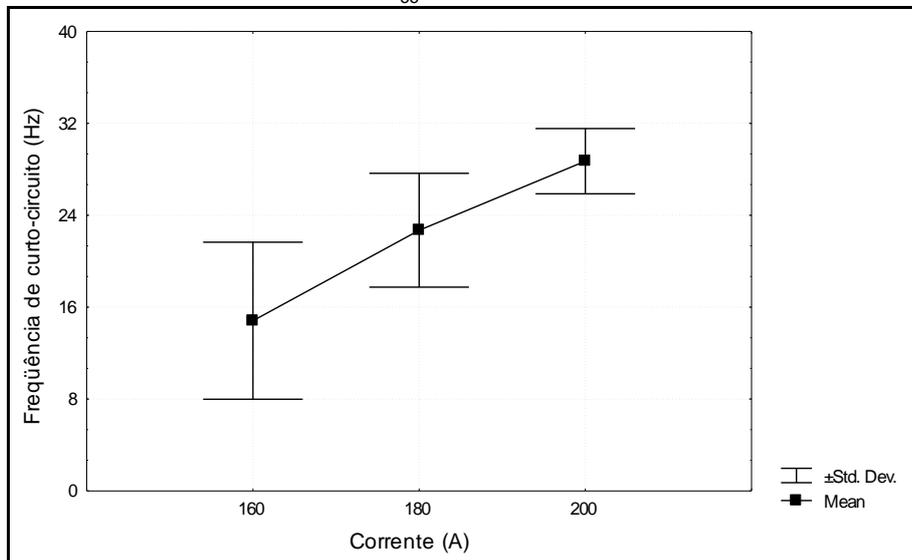


Figura 25 – Influência da corrente de soldagem sobre F_{cc} .

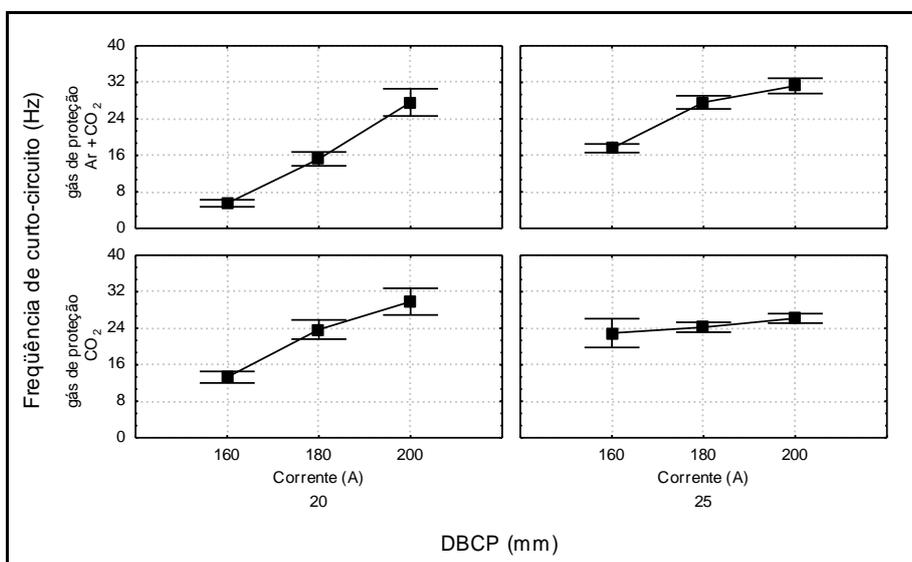


Figura 26 – Relação entre os parâmetros de soldagem e F_{cc} .

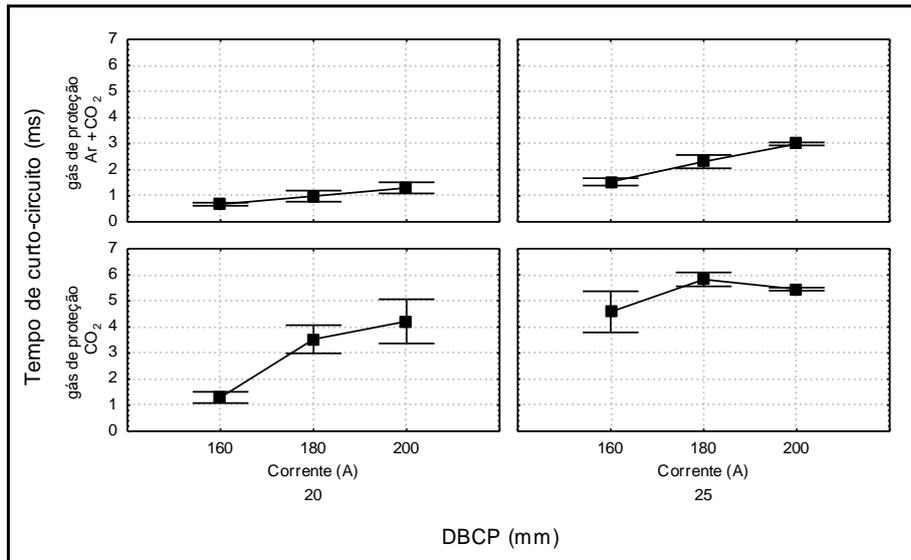


Figura 27 – Relação entre os parâmetros de soldagem e t_{cc} .

Estudo das características econômicas

A Tabela 10 apresenta os valores médios das características econômicas representadas pela taxa de fusão (TF), taxa de deposição (TD) e eficiência de deposição (ED), para os ensaios realizados. Esses dados foram submetidos a análise de variância (ANOVA). Os valores de α estão indicados na Tabela 11.

O desempenho de um consumível com relação a sua característica econômica poderá ser influenciado por muitos fatores e variáveis do processo. A Tabela 11 indica que o tipo de gás de proteção não afetou as características econômicas do eletrodo empregado e que a corrente foi o fator de maior importância.

Tabela 10 – Resultado das características econômicas (processo convencional).

Tipo de gás	DBCP (mm)	Corrente (A)	TF (kg/h)	TD (kg/h)	ED (%)
CO ₂ + Ar	20	161	2,12	1,97	92,86
		180	2,48	2,29	92,56
		203	3,10	2,76	89,20
	25	160	2,49	2,27	91,02
		182	3,04	2,83	92,95
		200	3,61	3,12	86,28
CO ₂	20	161	2,26	2,04	90,47
		182	2,89	2,58	89,39
		201	3,35	3,01	89,66
	25	160	2,76	2,51	91,12
		183	3,16	2,90	91,69
		199	3,96	3,28	82,77

Tabela 11 – Análise de variância (ANOVA) para as características econômicas.

Fator	Fator α (%)
	Características Econômicas

	TF	TD	ED
1 – Gás	15,29	19,22	10,79
2 – DBCP	6,63	0,48	17,35
3 – I_{ef}	7,00	0,00	0,00
Interação – 1 x 2	8,386	85,71	94,46
Interação – 1 x 3	9,891	96,38	81,64
Interação – 2 x 3	10,809	52,09	0,01

Nas Figuras 28 e 29 pode-se observar a influência da DBCP sobre TF e TD respectivamente. Na Figura 28 verifica-se que com o aumento no valor da DBCP tem-se um aumento na TF. Tal efeito era esperado, pois, segundo Medeiros et al [18], o calor desenvolvido no arco elétrico e o calor desenvolvido por efeito Joule na extensão fora do bico de contato são as principais causas responsáveis pela fusão do arame, ou seja, pela TF. As expressões para a soldagem em corrente contínua e pulsada são as seguintes (Equações 6 e 7):

$$w = \alpha \cdot \bar{I} + \beta \cdot \ell \cdot I_{ef}^2 \quad (6)$$

e

$$w = \alpha \cdot \bar{I} + \beta \cdot \ell \cdot I_p^2 \cdot t_p \cdot F \quad (7)$$

Conforme Medeiros et al [18] w é a velocidade de alimentação, α e β são constantes de fusão, \bar{I} é a intensidade de corrente média, I_p é a corrente de pico, ℓ é o comprimento livre de arame, t_p é o tempo de pico e F a frequência de pulsação.

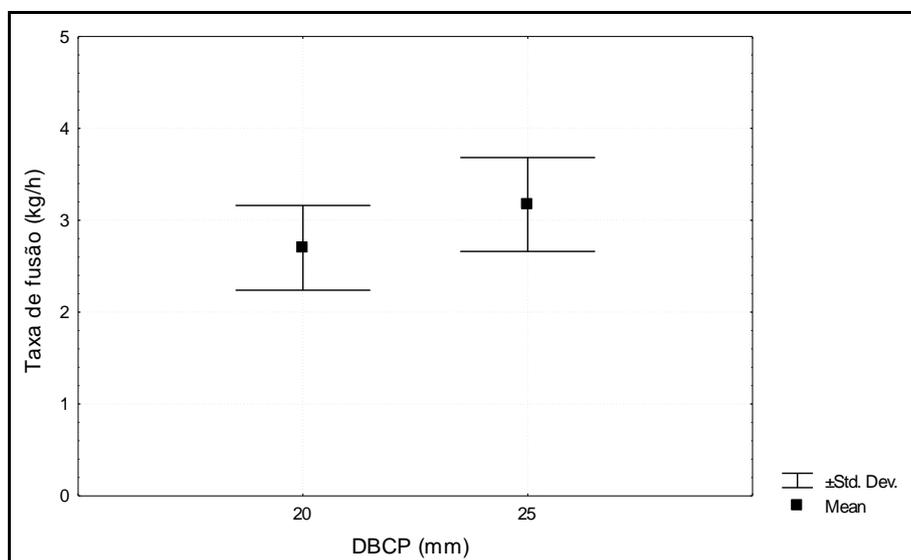


Figura 28 – Influência da DBCP sobre a taxa de fusão.

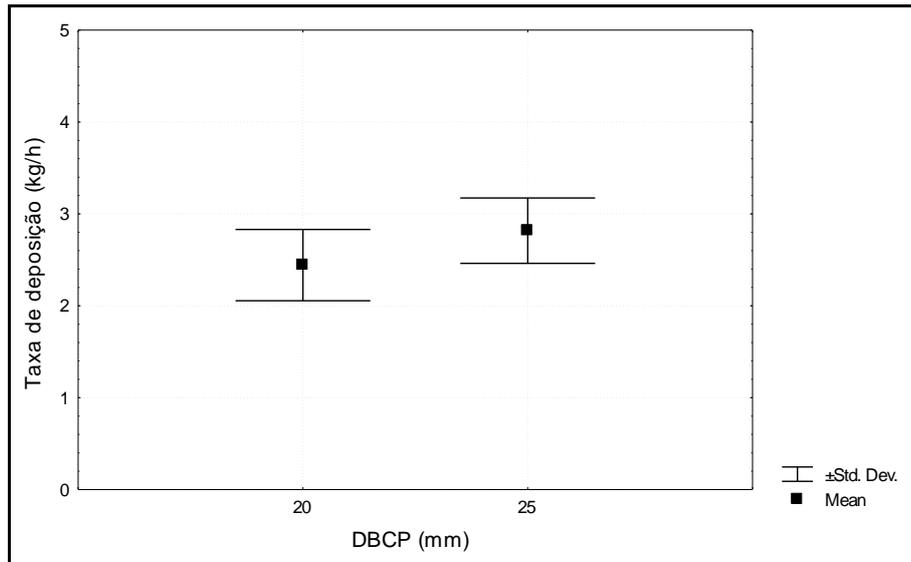


Figura 29 – Influência da DBCP sobre a taxa de deposição.

Através dessas relações e mantendo-se constantes os valores de corrente média e eficaz, é de se esperar que, para soldagem com corrente contínua, haja variações em w com a variação da DBCP. Assim com o aumento no valor da DBCP, ter-se-á o aumento na TF.

De acordo com a Tabela 11, não se verifica a influência da DBCP sobre ED, logo é de se esperar que TD acompanhe o mesmo comportamento de TF. Pela Figura 29 verifica-se esse comportamento, onde se pode perceber um crescimento da TD com o aumento no valor da DBCP.

Em relação à corrente de soldagem, pela Tabela 11 verifica-se uma influência marcante sobre todos os índices ($\alpha = 0,00\%$ para todos os índices). Segundo Medeiros et al [18], a corrente de soldagem é um dos fatores que está diretamente ligado a TF. Pela equação citada anteriormente observa-se que quanto maior for a intensidade de corrente para um mesmo valor de DBCP, maior será TF. Isto pode ser confirmado quando se observa a Figura 30. Pela observação dessa figura é possível verificar a validade da equação, onde se observa que quanto maior for a intensidade de corrente, maior o valor de TF. Pela Figura 31 é possível se observar o mesmo efeito para TD.

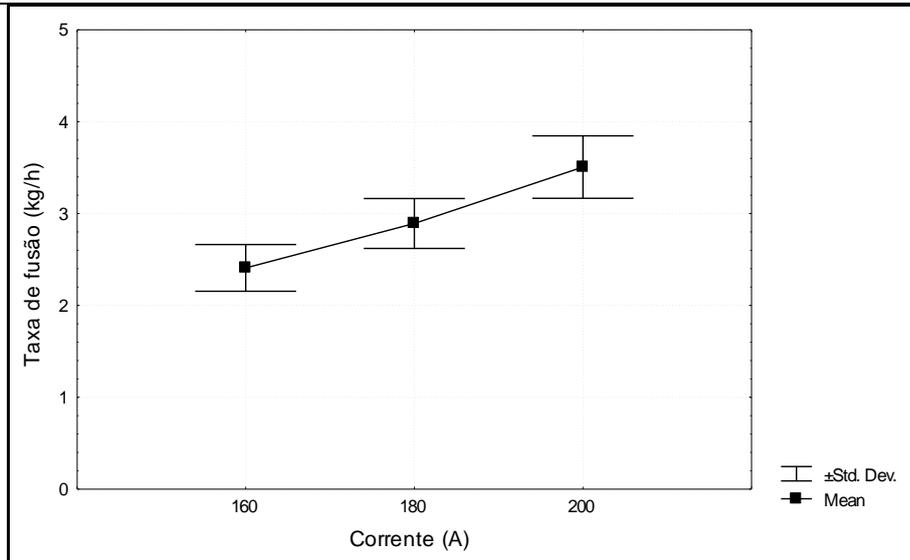


Figura 30 – Influência da corrente de soldagem sobre TF.

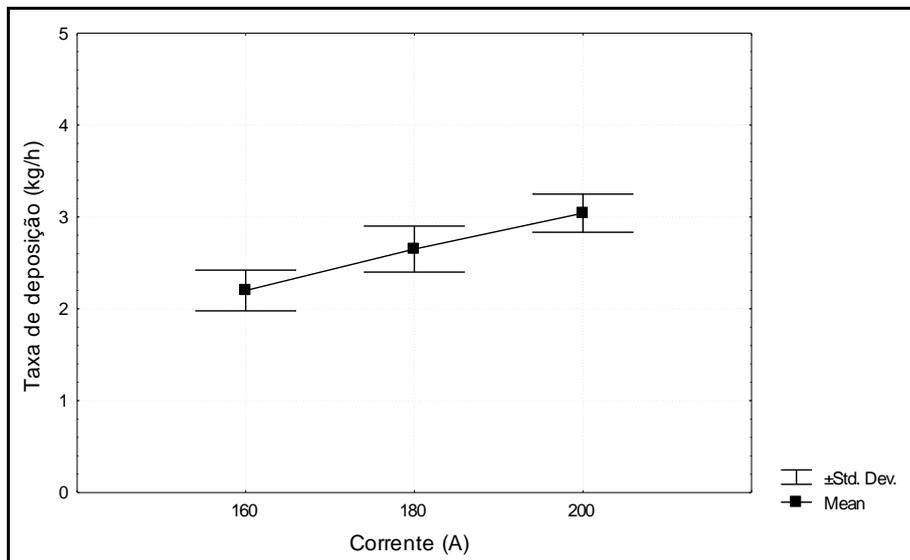


Figura 31 – Influência da corrente de soldagem sobre TD.

Na Figura 32 verifica-se a influência da corrente de soldagem sobre ED. Nota-se nitidamente que para níveis de corrente acima de 180 A, a tendência é de decréscimo na eficiência de deposição do arame. A eficiência de deposição é a relação entre a TD e a TF. Assim, durante a soldagem existem alguns fenômenos que interferem diretamente nesse índice. Um deles é a geração de respingos. Tal fato é, geralmente, decorrente da instabilidade do arco durante a soldagem. Verificou-se anteriormente que com o aumento no valor da intensidade de corrente de soldagem tem-se também aumentado o número de curtos-circuitos. Pode-se analisar também que com o aumento da corrente de soldagem, aumenta-se a energia, diminuindo assim a viscosidade do metal fundido. É possível que a diminuição da viscosidade provoque o aumento do tamanho das gotas geradas na extremidade livre do arame durante a

soldagem. Essas gotas maiores podem vir a provocar, a geração de respingos quando estas se chocam com a poça de fusão. Assim, com o aumento da corrente de soldagem é de se esperar que haja uma maior incidência de respingos e, conseqüentemente, menor valor de ED, já que esses respingos representam material desperdiçado. Este efeito é mais significativo para maiores valores de DBCP, como indica a Figura 33 e o efeito da interação (2x3), apresentado na Tabela 11.

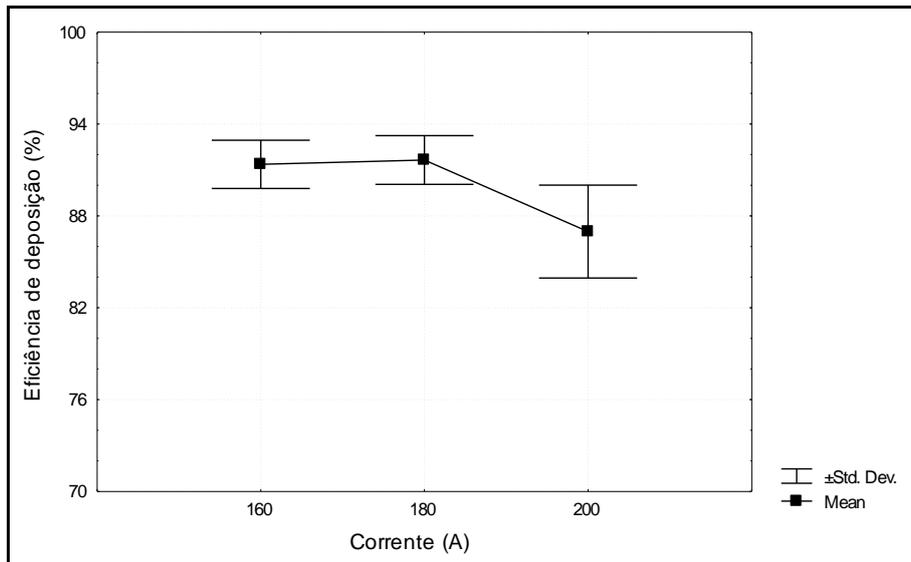


Figura 32 – Influência da corrente de soldagem sobre ED.

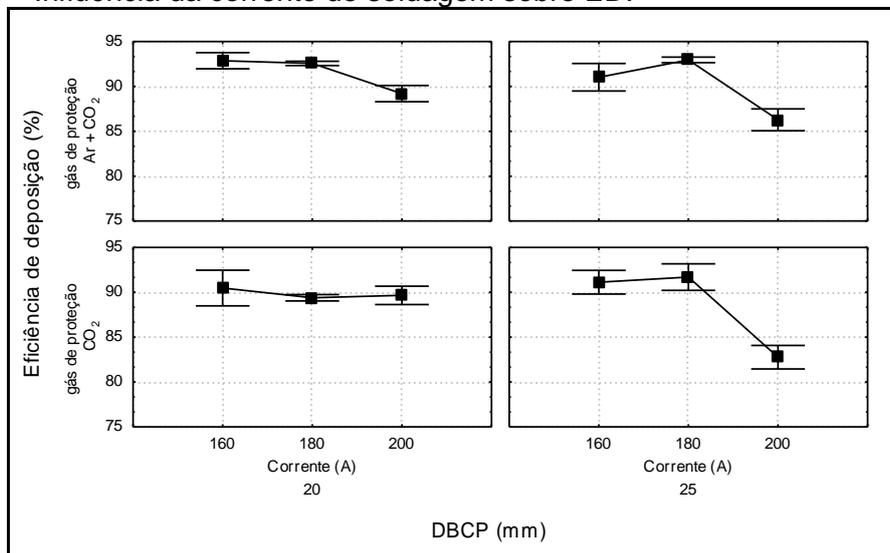


Figura 33 – Relação entre os parâmetros de soldagem e ED.

Estudo das características geométricas

As características geométricas avaliadas (reforço, a penetração e a largura) estão apresentadas na Figura 34.

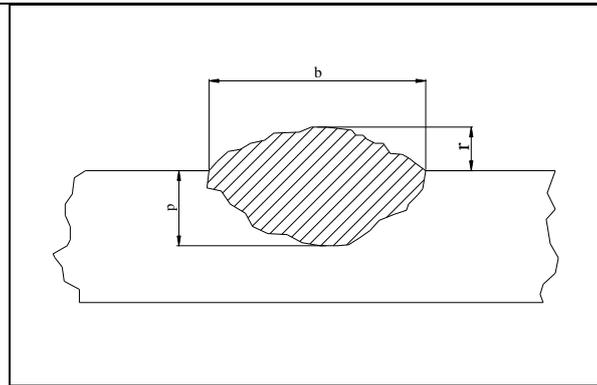


Figura 34 – Esquema de uma seção transversal da solda, ilustrando seus parâmetros geométricos.

A Tabela 12 apresenta os valores médios das características geométricas representados pela largura (b), reforço (r) e penetração (p).

Tabela 12– Resultado das características geométricas (processo convencional).

Tipo de gás	DBCP (mm)	Corrente (A)	b (mm)	r (mm)	p (mm)
CO ₂ + Ar	20	161	11,86	2,68	0,42
		180	11,57	2,72	0,53
		203	11,36	2,82	0,54
	25	160	9,70	2,92	0,57
		182	9,62	3,00	0,45
		200	7,61	3,10	0,82
CO ₂	20	161	11,20	2,92	0,42
		182	9,59	3,49	0,96
		201	9,08	3,51	1,15
	25	160	8,84	3,84	0,62
		183	8,25	3,91	0,91
		199	7,38	4,04	1,00

Na Tabela 13 observam-se os resultados da análise de variância para o estudo das características geométricas da solda. Pela análise dessa tabela verifica-se que todos os fatores tiveram influência na geometria da solda, salientando-se a influência marcante do tipo de gás de proteção sobre os parâmetros em questão.

O resultado esperado para um aumento de corrente média, onde os demais parâmetros mantêm-se constantes, é um acréscimo da largura do cordão de solda. Contudo conforme a Figura 35 constatou-se que o mesmo não ocorreu porque a área adicionada foi mantida constante. Fixando-se este parâmetro, impõe-se uma relação constante entre as velocidades de alimentação e de soldagem, ou seja, aumentando-se a corrente média, para uma área adicionada constante, aumenta-se tanto a velocidade de soldagem quanto a velocidade de alimentação do arame. No caso dos experimentos analisados, pode-se afirmar que o aumento da velocidade de soldagem foi mais crítico que o aumento da velocidade de alimentação, para os dois tipos de gás, provocando uma queda na largura do cordão de solda com o aumento da corrente média Figura 35. O reforço do cordão de solda não foi afetado pela

corrente de soldagem (Figura 36).

Tabela 13 – Análise de variância (ANOVA) para as características geométricas.

Fator	Fator α (%)		
	Características Geométricas		
	b	r	p
1 – Gás	1,67	0,00	0,05
2 – DBCP	11,00	0,52	52,72
3 – I_{ef}	12,56	37,67	0,10
Interação – 1 x 2	13,98	1,69	45,81
Interação – 1 x 3	14,72	54,36	0,11
Interação – 2 x 3	15,33	81,51	43,94

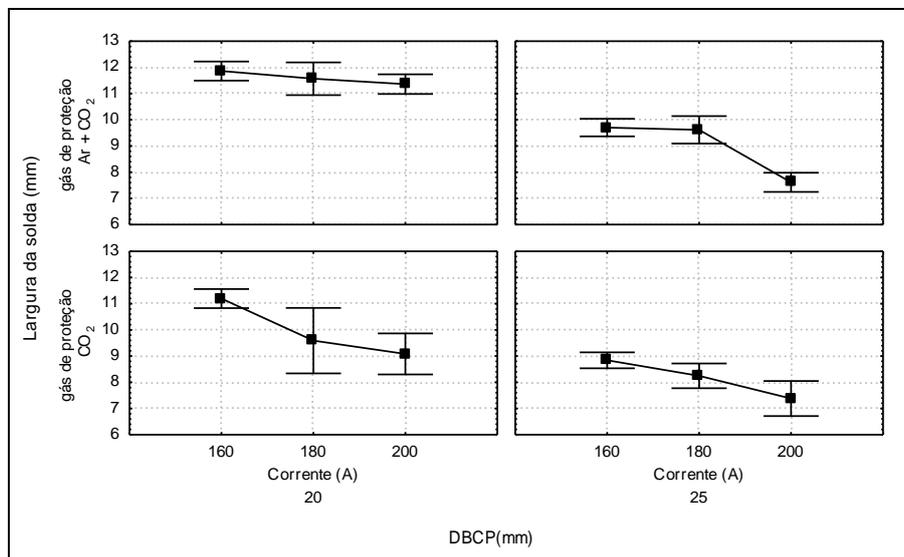


Figura 35 – Efeito dos fatores sobre a largura.

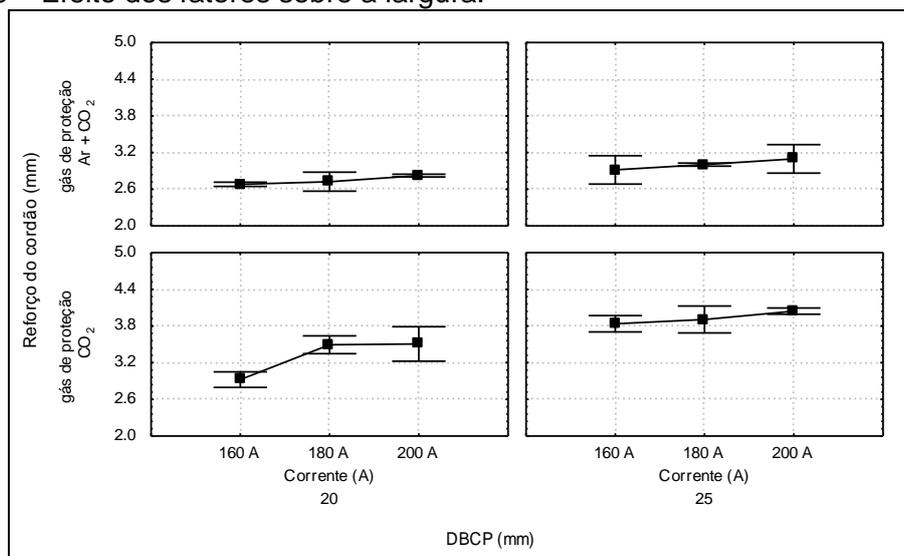


Figura 36 – Efeito dos fatores sobre o reforço.

A mudança do tipo de gás influi na geometria do arco voltaico [15], gerando mudanças na forma do cordão. O arco gerado com CO_2 puro tende a ser mais constricto, promovendo influência marcante na geometria da solda, diminuindo a largura do cordão, aumentando o seu reforço e a penetração (Figuras 36 e 37). A solda com $\text{Ar} + \text{CO}_2$, por sua vez, tende a apresentar uma maior largura e um menor reforço, pois o arco gerado por esse tipo de gás incide numa área maior do metal de base. Verifica-se que as penetrações utilizando o CO_2 foram maiores que aquelas utilizando a mistura gasosa $\text{Ar} + \text{CO}_2$ [15].

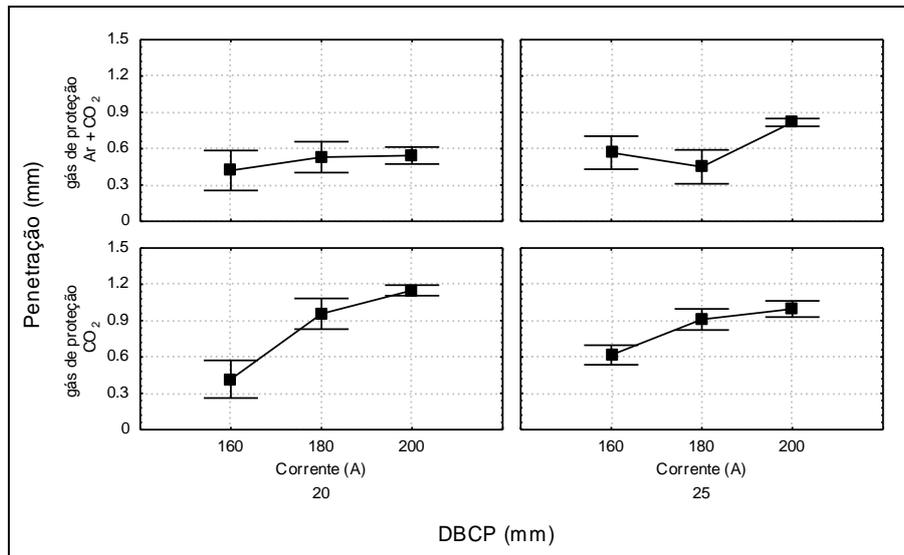


Figura 37 – Efeito dos fatores sobre a penetração.

A maior constrição do arco para o CO_2 , provoca uma maior pressão do arco sobre a poça de fusão, o que causará uma maior penetração, como pode ser visto na Figura 37. Ainda nesta figura, constata-se que este efeito é muito dependente do valor da corrente. Este fato está associado ao efeito da corrente sobre a força do arco, que é um fator determinante da penetração. Para maiores valores da corrente observa-se (Figura 37) um aumento da penetração que é mais marcante para a soldagem com CO_2 puro.

Segunda etapa (soldagem com corrente pulsada)

A seguir apresenta-se uma análise da soldagem com o arame tubular E71T-1 em corrente pulsada.

A Tabela 14 apresenta os valores médios de tensão e os valores médios e eficazes da corrente, obtidos na realização dos ensaios em função do tipo de gás, DBCP e a relação entre as velocidades de alimentação (V_a) do arame e de soldagem (V_s). A última coluna à direita da tabela, mostra os valores das relações V_a/V_s obtidos. Observando essa tabela pode-se verificar que foram mantidos aproximadamente os mesmos valores da corrente eficaz de soldagem empregados na etapa I. Observa-se ainda que a razão entre as velocidades de alimentação e de soldagem mantiveram-se praticamente constante.

Tabela 14 – Parâmetros de soldagem para o processo pulsado.

Gás	DBCP (mm)	I_{ef} (A)	I_m (A)	U_m (V)	v_a (m.min ⁻¹)	v_s (m.min ⁻¹)	Razão(v_a/v_s)
CO ₂ e Ar	20	156	132	23	4,6	0,21	21,9
		173	153	23	5,7	0,25	22,8
		184	170	23	6,2	0,30	20,7
	25	154	130	23	5,0	0,25	20,0
		170	152	23	6,1	0,30	20,3
		185	172	23	7,3	0,40	20,9
CO ₂	20	160	134	23	5,0	0,22	22,7
		175	156	23	5,8	0,27	21,5
		188	173	23	6,6	0,31	21,3
	25	160	135	23	5,7	0,25	22,8
		175	155	23	6,6	0,30	22,0
		188	175	23	7,8	0,35	22,3

Estudo da estabilidade do arco

A Tabela 15 apresenta o resultado da ANOVA para a estabilidade do arco no processo com corrente pulsada. Já a Tabela 16 mostra os resultados da análise de estabilidade.

A Figura 38 mostra o histograma dos tempos de curto-circuito para o gás CO₂. Verifica-se massiva concentração das observações abaixo de 2 ms, o que caracteriza curtos-circuitos sem transferência metálica, conforme descrito anteriormente. Assim, pode-se afirmar que o controle da corrente atua modificando sensivelmente o modo de transferência metálica para a soldagem com o gás CO₂. Na Figura 39 verifica-se, o comportamento semelhante para a soldagem com proteção de Ar +CO₂. Neste caso, os curtos circuitos são quase que totalmente eliminados por efeito da pulsação de corrente.

Tabela 15 – Análise de variância (ANOVA) para a estabilidade do arco.

Fatores	Fator α (%)	
	F_{cc}	t_{cc}
1 – Gás	0,00	38,20
2 – DBCP	13,54	0,25
3 – I_{ef}	61,21	32,34
Interação – 1 x 2	0,05	54,45
Interação – 1 x 3	58,84	99,03
Interação – 2 x 3	45,82	31,45

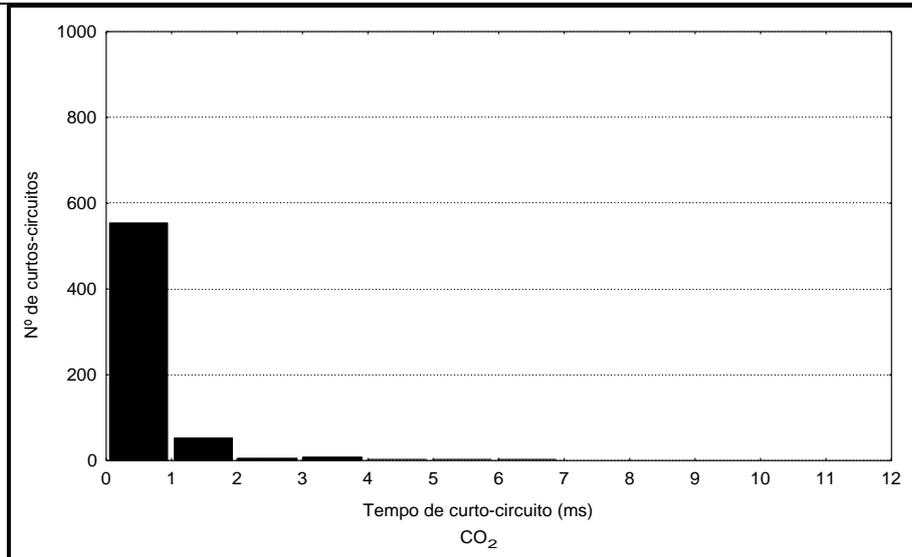


Figura 38 – Histograma dos curtos-circuitos para corrente pulsada com CO_2 .

As Figuras 40 e 41 tem-se oscilogramas para soldagens com $\text{Ar} + \text{CO}_2$ e CO_2 puro cujas demais condições operacionais são semelhantes. Pode-se observar pelas curvas de tensão que a soldagem com a mistura de gases é, mais estável que a soldagem com CO_2 puro.

As Tabelas 15 e 16 mostram que o tipo de gás de proteção influi significativamente sobre F_{cc} . Tal influência é descrita na Figura 42.

Observa-se uma maior frequência de curtos-circuitos com a utilização de CO_2 puro e DBCP de 25 mm. A DBCP foi o único fator que afetou o t_{cc} na soldagem com corrente pulsada, como indica a Tabela 15 e a Figura 43.

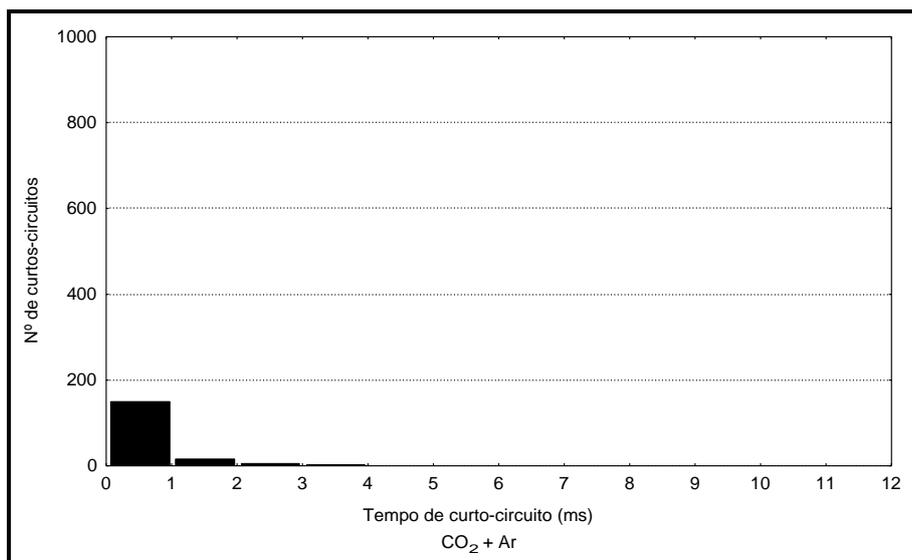


Figura 39 – Histograma dos curtos-circuitos para corrente pulsada com $\text{Ar} + \text{CO}_2$.

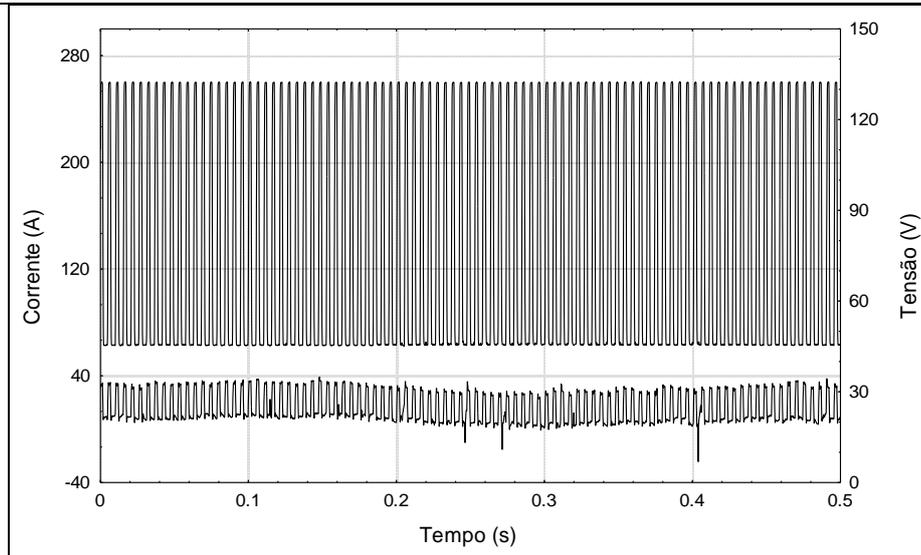


Figura 40 – Oscilograma para DBCP de 20 mm, usando Ar + CO₂ com corrente pulsada.

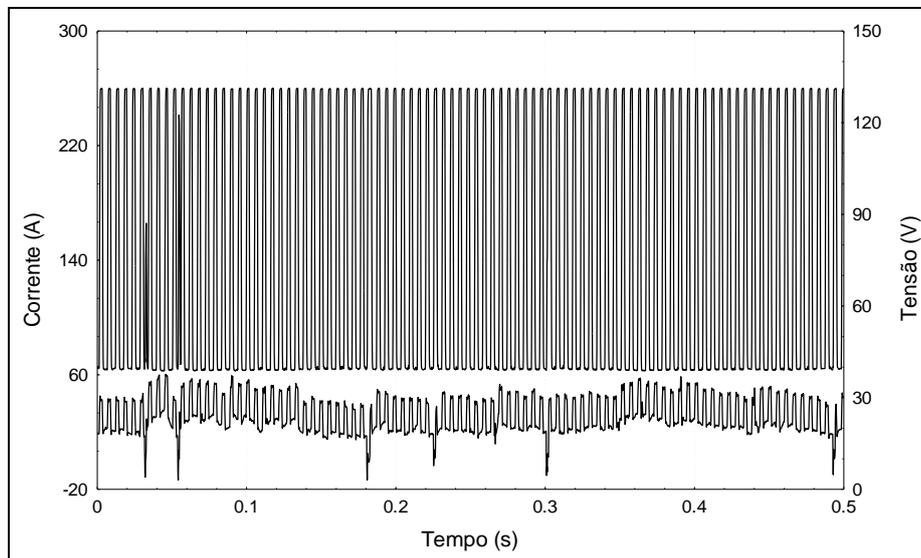


Figura 41 – Oscilograma para DBCP de 20 mm, usando CO₂, com corrente pulsada.

Tabela 16 – Resultados da análise de estabilidade (processo pulsado).

Tipo de gás	DBCP (mm)	Corrente (A)	F _{CC} (Hz)	t _{CC} (ms)
CO ₂ + Ar	20	156	2,22	0,56
		173	6,22	0,67
		184	4,56	0,72
	25	154	0,78	0,39
		170	2,78	0,40
		185	3,11	0,55
CO ₂	20	160	5,11	0,59
		175	9,11	0,71
		188	7,33	1,04
	25	160	16,22	0,54
		175	11,33	0,49
		188	20,33	0,40

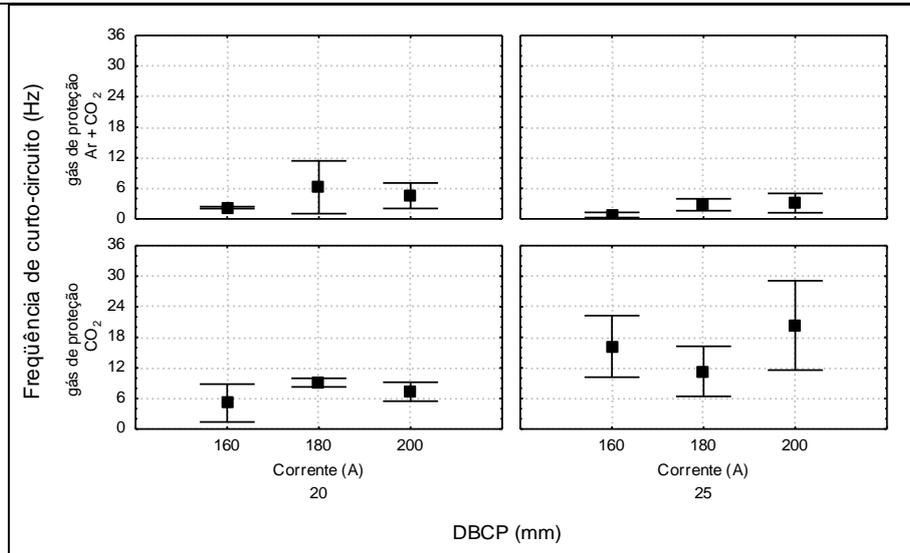


Figura 42 – Efeito dos fatores sobre F_{cc} .

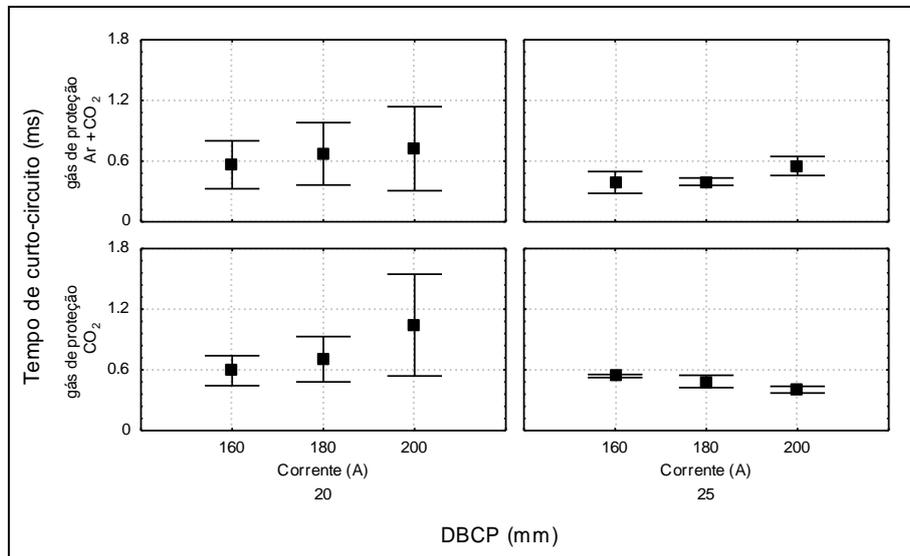


Figura 43 – Efeito dos fatores sobre t_{cc} .

A imposição de corrente atua de forma mais eficiente do ponto de vista da estabilidade, com a utilização da mistura Ar + CO₂, uma vez que neste caso a mudança da DBCP de 20 para 25 mm, provocou uma mudança pouco significativa no índice F_{cc} (Figura 42) em contraste ao comportamento das soldagens com a utilização do CO₂ puro, onde se verifica uma variação no fator F_{cc} e também uma maior dispersão nos valores para DBCP de 25 mm, demonstrando menor estabilidade, uma vez que nesse tipo de processo os curtos-circuitos não são desejados.

O argumento acima é complementado pela Figura 43, onde se observa que muito embora o processo que utiliza CO₂ puro tenha uma tendência para a transferência por curto-circuito, o controle da corrente atuou de forma eficiente para evitar que a transferência

ocorresse fora dos padrões de pulsação, uma vez que os tempos de curto-circuito não excederam o valor estimado por Farias [12] de 2 ms.

Estudo das características econômicas

A Tabela 17 nos apresenta os valores médios das características econômicas representadas pela taxa de fusão (TF), taxa de deposição (TD) e eficiência de deposição, para os ensaios realizados.

A Tabela 18 apresenta o resultado da análise de variância das características econômicas (taxa de fusão, taxa de deposição e eficiência de deposição) na soldagem em corrente pulsada.

Tabela 17 – Resultado das características econômicas (processo pulsado).

Tipo de gás	DBCP (mm)	Corrente (A)	TF (kg/h)	TD (kg/h)	ED (%)
CO ₂ + Ar	20	156	1,77	1,53	86,30
		173	2,21	1,92	86,76
		184	2,42	2,14	88,45
	25	154	1,93	1,68	86,99
		170	2,38	2,07	86,96
		185	2,80	2,47	88,20
CO ₂	20	160	1,92	1,63	84,77
		175	2,26	1,92	85,15
		188	2,53	2,18	86,05
	25	160	2,19	1,87	85,23
		175	2,55	2,18	85,49
		188	3,01	2,54	84,28

Tabela 18 – Análise de variância (ANOVA) para as características econômicas.

Fatores	Fator α (%)		
	TF	TD	ED
1 – Gás	19,42	43,08	0,05
2 – DBCP	1,42	1,70	93,18
3 – I_{ef}	0,00	0,00	50,27
Interação – 1 x 2	61,70	70,29	63,55
Interação – 1 x 3	83,03	75,82	41,43
Interação – 2 x 3	8,93	15,25	59,76

Observa-se na Tabela 18 que a corrente de soldagem e a DBCP, de maneira global afetaram significativamente a taxa de fusão (TF) e a taxa de deposição (TD), como era esperado, não tendo afetado sobremaneira a eficiência de deposição (ED), (Figuras 44, 45 e 46). O aumento de TF com a corrente é mais acentuado na DBCP de 25mm, efeito decorrente da maior contribuição do efeito Joule nessa condição.

A Tabela 18 mostra que a eficiência de deposição (ED) é afetada com certa relevância pela mudança de Ar + CO₂ para CO₂ puro. Observa-se, pela Figura 46 um decréscimo em ED com a utilização de CO₂ puro. Este resultado é devido ao aumento no teor

de respingos gerado pela maior incidência de curtos-circuitos com a utilização desse gás (Tabela 16), pois estes curtos junto com a oscilação da poça de fusão, provocada pela pulsação da corrente, incrementam o teor de respingos. Algumas pequenas explosões, características da aplicação de CO_2 puro também contribuem para esta queda na eficiência de deposição.

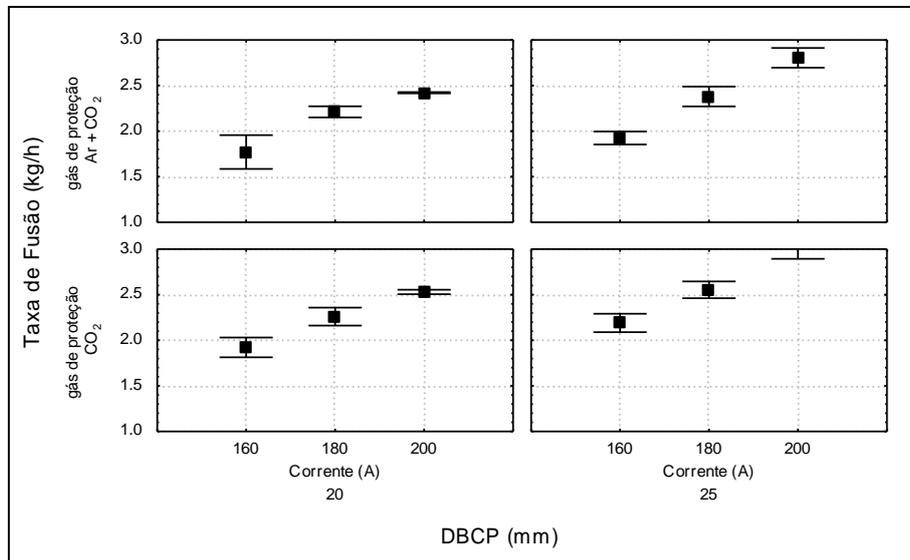


Figura 44 – Efeito dos fatores sobre TF.

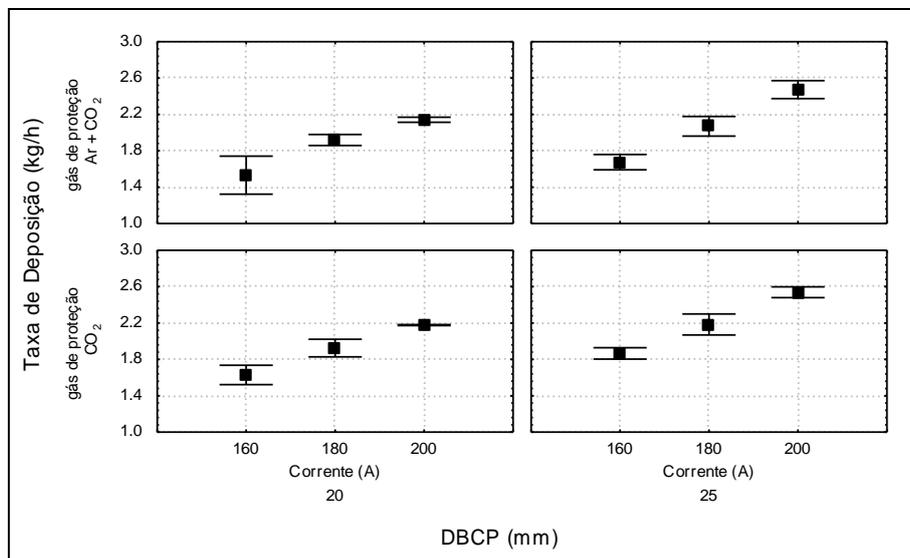


Figura 45 – Efeito dos fatores sobre TD.

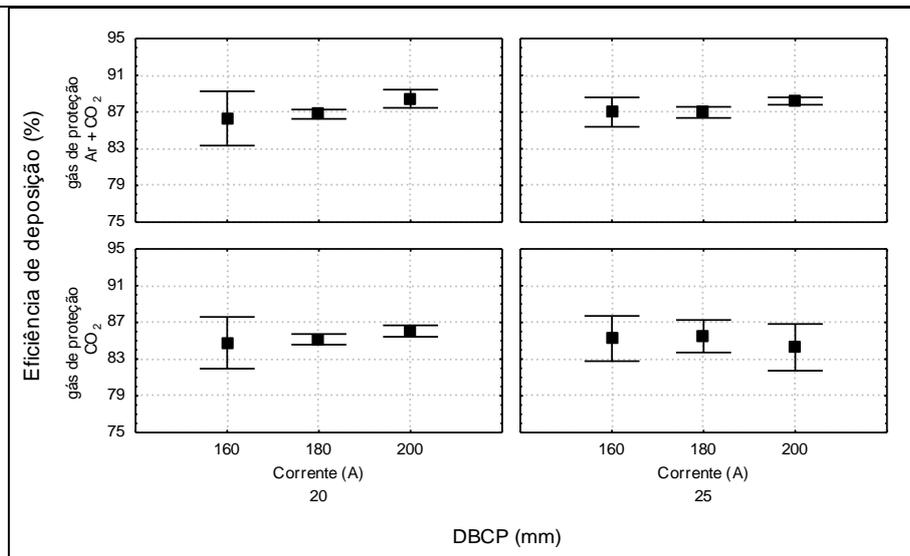


Figura 46 – Efeito dos fatores sobre ED.

Estudo das características geométricas

A Tabela 19 apresenta os valores médios das características geométricas representadas pela largura (b), reforço (r) e penetração (p) para os ensaios realizados.

A Tabela 20 apresenta o resultado da análise de variância dos fatores sobre as características geométricas do cordão de solda na soldagem em corrente pulsada.

Tabela 19– Resultado das características geométricas (processo pulsado).

Tipo de gás	DBCP (mm)	Corrente (A)	b (mm)	r (mm)	p (mm)
CO ₂ + Ar	20	156	11,67	2,97	0,60
		173	11,58	2,87	0,57
		184	11,57	2,86	0,69
	25	154	11,23	3,42	0,51
		170	11,41	3,36	0,54
		185	11,07	3,56	0,55
CO ₂	20	160	10,85	3,43	0,35
		175	11,30	3,40	0,49
		188	11,03	3,20	0,75
	25	160	11,18	3,86	0,41
		175	10,18	4,20	0,49
		188	9,45	4,00	0,43

Tabela 20 – Análise de variância (ANOVA) para as características geométricas.

16 Fator	17 Fator α (%)		
	b	r	p
1 – Gás	0,42	0,05	10,99
2 – DBCP	3,23	0,00	0,00
3 – I _{ef}	18 3 8,12	96,40	14,74
Interação – 1 x 2	35,62	44,35	99,20
Interação – 1 x 3	57,63	66,58	52,43
Interação – 2 x 3	30,30	60,31	16,80

A penetração da solda (Figura 49) foi afetada apenas pela DBCP. Uma vez que a velocidade de soldagem foi ajustada para manter a área adicionada constante, em corrente pulsada não foi possível determinar os efeitos da corrente eficaz sobre a geometria da solda. A utilização de uma mistura de gases no lugar do CO_2 puro afetou significativamente o reforço do cordão e a largura do cordão de solda.

Observa-se que as soldas com $\text{Ar} + \text{CO}_2$ tende a possuir um menor reforço e uma maior largura, (Figuras 47 e 48). Isto está demonstrando que as soldas com a mistura $\text{Ar} + \text{CO}_2$ possuem um aspecto mais tênue, com uma melhor conformação do cordão, reduzindo a formação de pontos de concentração de tensão e melhorando o aspecto do depósito. O aumento da DBCP tende a diminuir a largura e aumentar o reforço do cordão de solda. Esta tendência é mais pronunciada para a soldagem com CO_2 puro (Figuras 47 e 48).

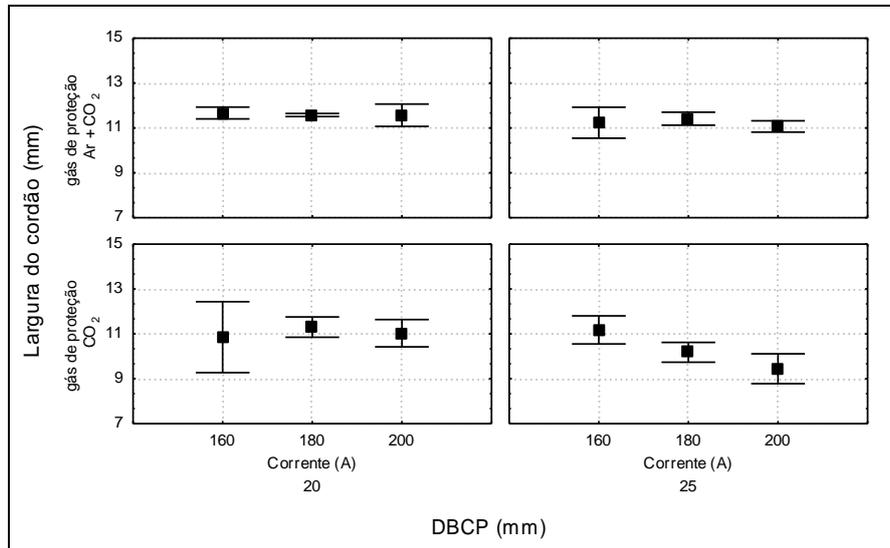


Figura 47 – Efeito dos fatores sobre a largura.

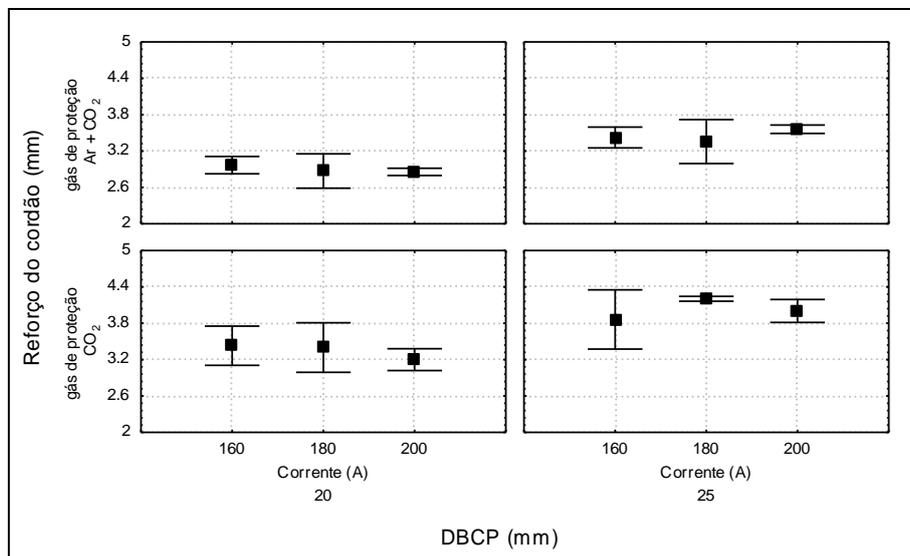


Figura 48 – Efeito dos fatores sobre o reforço.

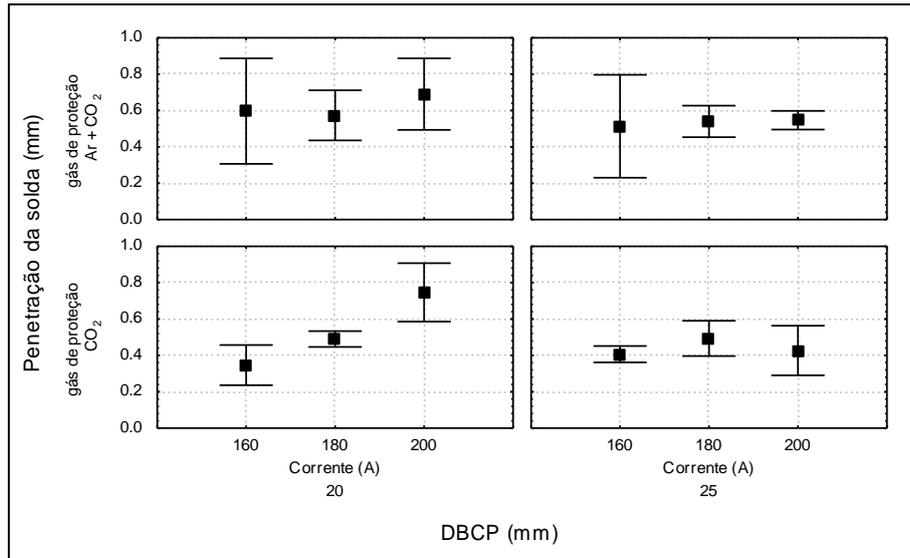


Figura 49 – Efeito dos fatores sobre a penetração.

CAPÍTULO V

conclusões

A mudança de CO₂ puro para uma mistura de CO₂ + Ar:

- modifica sensivelmente o modo de transferência metálica na soldagem a arame tubular;
- melhora a eficiência de deposição na soldagem em corrente pulsada, mas não exerce efeito sobre as características econômicas no modo tensão constante.
- afeta sensivelmente as características geométricas do cordão de solda.

O aumento da DBCP de 20 mm para 25 mm:

- afeta significativamente o modo de transferência metálica e a estabilidade do arco;
- afeta a Taxa de Fusão e a Taxa de Deposição, mas não exerce efeito significativo sobre a Eficiência de Deposição;
- afeta a largura e o reforço do cordão de solda, mas não exerce efeito significativo sobre a penetração no modo tensão constante.

O efeito da Intensidade de corrente sobre a operacionalidade do arame tubular E71T-1 depende sensivelmente do tipo de corrente (convencional ou pulsada) e do tipo de gás de proteção.

CAPÍTULO VI

sugestões para trabalhos futuros

1. Avaliar o efeito do gás de proteção sobre as características metalúrgicas do cordão de solda, utilizando corrente pulsada na soldagem com arame tubular do tipo AWS E71T-1.
2. Estudo da transferência metálica na soldagem a arame tubular utilizando corrente pulsada e equipamento para a filmagem das gotas.
3. Estudo do desempenho da fonte de energia na soldagem com arame tubular utilizando corrente pulsada com proteção gasosa.
4. Avaliar o efeito do tipo de gás de proteção na operacionalidade do processo AT em soldagem fora da posição plana

CAPÍTULO VII

bibliografia

- [1] BRAGA, E. M. “Soldagem a arame tubular autoprotégido em corrente pulsada”. Dissertação, UFPA, Belém, dezembro, 1997.
- [2] MOTA, C. A. M. “Níquel e manganês como controladores da tenacidade na soldagem com arames tubulares autoprotégidos”. Tese de Doutorado, UFSC, Dezembro, 1997.
- [3] BONISZEWSKY, T. “Self-shielded arc welding”. Woodhead Publishing Ltd. In Association with the Welding Institute, Cambridge England, 1992
- [4] OTEGUI, J: L. e De VEDIA, L. A. “Soldadura com alambres tubulares sin protección gaseosa”. Boletín Técnico Conarco, n. 81, p. 2-14/27-29, Jan., 1985.
- [5] WELDING HANDBOOK. Chapter 5, vol. 2, eighth edition, 1991.
- [6] WARD, R. F. “A study of gas-flux-metal reactions in flux-cored arc welding”. A thesis of doctor of philosophy. Department of Metallurgy and Materials the University Birmingham, 1985.
- [7] MACHADO, I. G. “Soldagem e técnicas conexas”. Livro editado pelo autor, 1997.
- [8] TREVISAN, R. E., FALS, H. C. “Características do trincamento assistido pelo hidrogênio de um aço microligado soldado pelo processo FCAW”. Soldagem e Inspeção, ano 5, nº 7, 1999.
- [9] SURIAN, E. S., RISSONE, N. M. R. “Efeito del gas de protección y del procedimiento de soldadura sobre las características del metal depositado por alambre tubular tipo AISI/AWS A5.20-95 E71T-1”. DEYTEMA, Fac. Reg. San Nicolás, Buenos Aires, Argentina 1998.
- [10] LUZ, T. S. “Influência do gás de proteção sobre as características operacionais de soldagem com arame tubular”. Monografia de Bacharelado em Engenharia Mecânica. Departamento de Engenharia Mecânica e de Produção, UFC, 2000.
- [11] FARIAS, J. P. “Magnésio metálico como componente do revestimento na soldagem com eletrodos ao C-Mn-Ni”. Florianópolis, 1993. Tese (Doutorado engenharia mecânica) Universidade Federal de Santa Catarina.
- [12] FARIAS, J. P. “Desempenho da fonte de energia na soldagem a arco elétrico com eletrodos revestidos”, 1998. Tese (Porf. Titular) Universidade Federal do Ceará.

-
- [13] FRENCH, I. E.; BOSWORTH, M. R. "A comparison of pulsed and conventional welding with basic flux cored and metal cored welding wires." Welding Journal, AWS, Miami, FL, USA, 1995.
- [14] MODENESI, P. J.; MARQUES, P. V.; SANTOS, D. B. "Curso de Metalurgia da Soldagem." Laboratório de Soldagem e Ensaio Não Destrutivos/DEM/UFMG, Belo Horizonte, 1992.
- [15] MIRANDA, H. C. "Influência da indutância na soldagem MIG/MAG na posição sobrecabeça". Universidade Federal de Uberlândia, 1999.
- [16] MARTINS, E. T. "Desempenho operacional da soldagem de alumínio pelo processo MIG com pulsação mista". Dissertação, Universidade Federal do Rio de Janeiro, 1999
- [17] BRANDI, S. D.; SOUZA, P. C. R. D. "Análise da transferência metálica na soldagem a arco elétrico com arame tubular". Soldagem & Inspeção, nº 10, Rio de Janeiro, 2000.
- [18] MEDEIROS, R. C.; QUINTINO, L.; OLIVEIRA SANTOS, J. F. "Estudo da aptidão dos arames tubulares à soldagem MIG com transferência controlada". Soldagem & Materiais, Nº 4, setembro/dezembro, 1989.
- [19] Manual da Inversal300, fabricante: IML/LABSOLDA-UFSC, 1995.
- [20] JEFFUS, L. "Welding. Principles and Applications". 4th edition.
- [21] LATHABAI, S., STOUT, R. D. "Shielding gas and heat input effects on flux cored weld metal properties". Welding Journal, november, 1985.
- [22] STENBACKA, N. "The influence of shielding gas on cored wires". Welding Journal, Nov. 1990.
- [23] POKHODNYA, I. K. "New Self-shielding flux-cored wire". E. O. P. Electric Welding Institute, Ucrânia, p. 27-33, July, 1992.
- [24] HARWIG, D. D., LONGENECKER, D. P., CRUZ, J. H. "Effects of welding parameters and electrode atmospheric exposure on the diffusible hydrogen content of gas shielded flux cored arc welds". Welding journal, Sept. 1999.
- [25] NORRISH, J. "Advanced Welding Process", Institute of Physics Publishing. Bristol Philadelphia and New York, 1992
- [26] GUPTA, S. R.; GUPTA, P. C., REHFELDT, D. 1988, "Application of Statistical Analysis for Process Stability Evaluation in GMA Welding", IIW/IIS doc. No. 212-710-88, pp.
- [27] MANZ, A. F. "Inductance vs. Slope Control for Gas Metal - Arc Power", Welding Journal, 1969 vol. 48, nº 9, pp 707 - 712
- [28] COSTA NETO, P. L. "O Estatística". ed. Edgard Blücher Ltda, São Paulo, 1977.

- [29] SOARES, J. F.; FARIAS, A. A. e CESAR, C. C. "Introdução à estatística". ed. Guanabara Koogan s. a., Rio de Janeiro, 1991.