

**UNIVERSIDADE FEDERAL DE SANTA CATARINA
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA MECÂNICA**

**SOLDAGEM MIG/MAG EM TRANSFERÊNCIA METÁLICA POR CURTO-
CIRCUITO CONTROLADO APLICADA AO PASSE DE RAIZ**

**DISSERTAÇÃO SUBMETIDA À UNIVERSIDADE FEDERAL DE SANTA
CATARINA PARA OBTENÇÃO DO TÍTULO DE MESTRE EM ENGENHARIA
MECÂNICA**

RÉGIS HENRIQUE GONÇALVES E SILVA

FLORIANÓPOLIS, FEVEREIRO DE 2005

**UNIVERSIDADE FEDERAL DE SANTA CATARINA
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA MECÂNICA**

**SOLDAGEM MIG/MAG EM TRANSFERÊNCIA METÁLICA POR CURTO-
CIRCUITO CONTROLADO APLICADA AO PASSE DE RAIZ**

RÉGIS HENRIQUE GONÇALVES E SILVA

ESTA DISSERTAÇÃO FOI JULGADA ADEQUADA PARA A OBTENÇÃO DO
TÍTULO DE

MESTRE EM ENGENHARIA

ESPECIALIDADE ENGENHARIA MECÂNICA
SENDO APROVADA EM SUA FORMA FINAL

Prof. Jair Carlos Dutra, Dr. Eng. – Orientador

Eng. Raul Gohr Jr, Dr. – Coorientador

Prof. José Antonio Bellini da Cunha Neto, Dr. Eng. - Coordenador do Curso

BANCA EXAMINADORA

Prof. Augusto José de Almeida Buschinelli, Dr. Ing. – Presidente

Eng. Alexandre de Meirelles Pope, Ph. D. – Membro

Eng. Carlos Eduardo Iconomos Baixo, Dr. Eng. – Membro

Prof. Américo Scotti, Ph. D. – Membro

**Aos meus pais Icléa e Leonil.
Aos meus irmãos Heber (In memoriam) e Renê.**

Agradecimentos

Agradeço sinceramente às pessoas que colaboraram na realização deste trabalho, em especial:

- ao Prof. Jair Carlos Dutra, orientador, por todo o conhecimento e experiência transmitidos e pela infra-estrutura disponibilizada;
- ao Eng. Raul Gohr Jr, pela co-orientação e apoio na bancada de ensaios e análise de resultados e também pelas aulas de surf;
- aos estagiários Fernando Pellizzaro e Leonardo Weck, que atuaram diretamente neste projeto;
- aos Engs. Carlos Eduardo Broering e Moisés Alves de Oliveira, pela vivência profissional;
- a toda equipe de engenheiros, técnicos e estagiários do LABSOLDA, pelo suporte em questões mecânicas, computacionais, eletrônicas, gráficas e administrativas, que muito contribuiu nas várias etapas do projeto;
- a Carolina Moreira, pela paciência, apoio e ajuda na confecção do texto;
- à ANP, CAPES, IMC e LABSOLDA, pelo apoio financeiro.

SUMÁRIO

LISTA DE FIGURAS	vii
LISTA DE TABELAS	x
Simbologia	xi
RESUMO	xiii
ABSTRACT	xiv
1 - Introdução	1
2 - Fundamentação Teórica	6
2.1 - Aquecimento e fusão do arame-eletrodo	6
2.1.1 - O arco voltaico e sua contribuição para a fusão do arame eletrodo...6	
2.1.2 - A contribuição do Efeito Joule na extensão de arame-eletrodo sólida (<i>stick out</i>) para o aquecimento	10
2.2 - Modos de transferência metálica – Curto-circuito e Corrente Pulsada	12
2.2.1 - Formação da gota metálica	13
2.2.2 - Forças envolvidas na transferência metálica	16
2.3 - Gases de Proteção	20
2.3.1 - Função	20
2.3.2 - Efeitos	21
2.3.3 - Fatores Econômicos	26
2.4 - Mecanismos de Penetração e Aporte Térmico	27
2.4.1 - Penetração	28
2.4.2 - Aporte térmico	29
2.5 - O processo MIG/MAG Convencional	30
2.5.2 - Aspectos relevantes do Mecanismo de Transferência Metálica	32
2.5.3 - Distância Bico de Contato – Peça (DBP)	39
2.5.4 - Estabilidade	40
2.6 - O Processo MIG/MAG em Transferência Metálica por Curto-circuito com Controle da Corrente (MIG/MAG TMCCC)	42
2.6.1 - Fundamentos	42
2.6.2 - Aplicações	46
2.6.3 - Experiência do LABSOLDA	47
3 - Objetivos e Justificativas	50
3.1 - Objetivos	50
3.2 - Justificativa	52
4 - Equipamentos, Materiais e Metodologia	59
4.1 - Equipamentos	59
4.2 - Questões Relativas a Normas	62
4.3 - Materiais	63
4.4 - Ensaios	65
5 - Resultados e Discussões	68

5.1 -	CC convencional	68
5.1.1 -	Definição do gás de proteção	68
5.1.2 -	Refinamento de variáveis e forma de onda para o CCC e determinação de parâmetros de controle	73
5.1.3 -	Aspectos da penetração do processo MIG/MAG em transferência metálica por curto-circuito convencional	77
5.2 -	CCC	79
5.2.1 -	Forma de onda	79
5.2.2 -	Geração de respingos na reignição do arco	92
5.2.3 -	Estudos sobre a penetração	94
5.2.4 -	Estudos sobre o Aporte Térmico	96
5.2.5 -	Determinação do sistema de controle da regularidade da transferência metálica	98
5.2.6 -	Testes em chanfros	100
5.2.7 -	Ensaio preliminares com CO ₂ puro	103
6 -	Conclusões e Sugestões para Trabalhos Futuros	105
7 -	Referências Bibliográficas	107

LISTA DE FIGURAS

Figura 2.1 - Oscilograma de uma solda MIG/MAG convencional, em transferência por curto-circuito ($U_{ref}=23$ V, $V_a=4$ m/min, $K_s=K_d=20$, $D_e=1,0$ mm).[88].....	8
Figura 2.2 - Relação entre tensão e corrente construída a partir da seqüência de períodos de transferência da Figura 2.1. [88].....	9
Figura 2.3 - Efeito da Distância Bico de Contato-Peça (DBP) e do diâmetro do eletrodo $\{D_E\}$ sobre o posicionamento da curva $\{V_a = C_1 \cdot I_e f^2 + C_2\}$. [20].....	9
Figura 2.4 - Aquecimento da extensão sólida do arame-eletrodo (<i>stick out</i>).....	10
Figura 2.5 - Contribuição do calor através da gota (originado na interface gota/arco) ao calor total para a frente de fusão, para diferentes L ($D_e=1,2$ mm). [17].....	11
Figura 2.6 - Efeito da corrente e da extensão de arame-eletrodo (L) na taxa de fusão (velocidade de arame, V_a)($D_e=1,2$ mm). [19].....	11
Figura 2.7 - Transferência de calor da interface arco/gota (H_a-Q_{ev}) para a frente de fusão: convecção. Perfil do fluxo de material: F_p : fluxo na periferia, F_c : fluxo central.	14
Figura 2.8 - Relação entre o volume da gota fundida $\{V_{f_{tmt}}\}$ e o valor da integral da corrente na fase de arco $\{I_a^2(t) \cdot dt\}_m$, representado no gráfico por $(S I_a^2)$. [20].....	15
Figura 2.9 - Relação entre o volume da gota fundida $\{V_{f_{tmt}}\}$ valor da integral da corrente na fase de arco $\{I_a^2 \cdot t \cdot m\}_m$. [20].....	16
Figura 2.10 - Atuação da Força de Lorentz, originada pelos campos eletromagnéticos na soldagem MIG/MAG: a) desmembramento da força em componente axial e longitudinal; b) atuação da componente longitudinal (F_{LA}). a)1 e b)4 são correspondentes, caracterizando uma F_{LA} contrária ao destacamento da gota. Já a)2 e b)3 caracterizam uma resultante F_{LA} a favor do destacamento. [20].....	18
Figura 2.11 - Redução do nível de respingos com a redução do teor de CO_2 no gás de proteção. [60].....	22
Figura 2.12 - Perfis de penetração típicos (e didáticos) de misturas de Ar e CO_2 a) baixa porcentagem de CO_2 e b) alta porcentagem de CO_2	23
Figura 2.13 - Tenacidade de soldas com dois diferentes gases de proteção, mesmo arame e condições de soldagem similares. [4].....	25
Figura 2.14 - Perda de a) Silício e b) Manganês por oxidação, como porcentagem do teor original do elemento no arame (a) 0,85%; b) 1,42%), de acordo com o potencial de oxidação do gás (segundo esta fonte, dado por $\{\% O_2 + 1,41 \cdot (\% CO_2)^{1/2}\}$ para o Si e $\{\% O_2 + 1,26 \cdot (\% CO_2)^{1/2}\}$ para o Mn). [4].....	25
Figura 2.15 - Efeito da composição do gás de proteção sobre a taxa de geração de fumos, para situações similares de soldagem. Eixo x em %. [26].....	26
Figura 2.16 - Custo geral típico da solda no processo produtivo, para aço comum. [35,60,61].	27
Figura 2.17 - Curso da transferência metálica por curto circuito no processo MIG/MAG convencional.	31
Figura 2.18 - Curva característica estática para uma fonte de tensão constante. L_2 é o comprimento de arco. $L_2 < L_1$. Para uma mesma DBP, L_2 depende da V_a	31
Figura 2.19 - Tendência à geração de respingos por expulsão da gota metálica no momento inicial do curto-circuito entre a esta e a poça fundida.....	33
Figura 2.20 - Comportamento da resistência no período de curto-circuito, mantendo-se num praticamente constante por cerca de 2 ms. [47].....	34
Figura 2.21 - Comportamento da resistência no período de curto-circuito, mantendo-se praticamente constante por cerca de 2 ms. [79].....	34

Figura 2.22 - Simulação da transferência metálica por curto-circuito, evidenciando maior tempo de destacamento para a) menores correntes e b) maiores volumes.[59]	35
Figura 2.23 - Transferência metálica por curto-circuito, evidenciando maior tempo de destacamento para soldas em a) menores correntes (escala ilustrativa de corrente) [45] e b) maiores volumes.[52].....	36
Figura 2.24 - Formas de onda de corrente (I) de diversos sistemas de soldagem MIG/MAG TMCCC. c) e d) mostram, também, o comportamento da tensão (U) de soldagem. [41],46,51,72,86,90].....	43
Figura 2.25 - Fases básicas de sistemas MIG/MAG TMCCC modernos.....	44
Figura 2.26 - Forma de onda de corrente com o circuito de redução de corrente. [30]	47
Figura 2.27 - Comparação da resistência do arame durante o curto-circuito em solda e simulações de curto. [30].....	48
Figura 2.28 - Relação entre tensão de curto-circuito (U_i) e tempo da fase 5 (tf_5). [30]	48
Figura 2.29 - Oscilogramas de tensão (U) e de corrente (I) representativos de uma soldagem estável na transferência por curto-circuito com controle da forma de onda em três níveis de corrente. [20].	49
Figura 4.1 - Bancada de ensaios.....	60
Figura 4.2 - Chanfradeira manual utilizada.....	61
Figura 4.3 - Exemplo de uso do AutoCAD para análise de corpo de prova (CP).	62
Figura 4.4 - Geometria da junta adotada.....	63
Figura 4.5 - Tocha adaptada.	64
Figura 4.6 - Dispositivos para posicionamento da tocha: posicionador da tocha a 90° em relação á peça, chamado de “verticalizador”; gabarito para determinação da DBP.	65
Figura 5.1 - Comportamento da corrente média (I_m) com a variação da distância bico de contato/peça (DBP), para os diferentes gases.	69
Figura 5.2 - Comportamento dos desvios padrões (A). Dados na Tabela 5.1	69
Figura 5.3 - Comportamento dos tccm ao longo das DBPs, para a) Ar + 25 % CO ₂ ; b) Ar + 8 % CO ₂ ; c) CO ₂ (ATENTAR PARA AS DIFERENTES ESCALAS)	71
Figura 5.4 - Número de picos de corrente, em um período de aquisição de 3 s, refletindo, juntamente com a V_a e o D_e , o volume médio de gotas, para cada gás, ao longo das DBPs. O número de picos de corrente pode ser avaliado de um gráfico como o da Figura 2.1, ou é fornecido diretamente por um <i>software</i> dedicado, como o MIG/MAG.	72
Figura 5.5 - Variação da DBP assumida, durante o passe de raiz da junta.....	74
Figura 5.6 - Comportamento da corrente e tensão médias ao longo das alterações na DBP, em ensaio robotizado sincronizado com aquisição de dados de soldagem. O gráfico é o sinal filtrado da corrente e tensão instantâneas, para melhor visualização da variação dos valores médios.	75
Figura 5.7 - Efeito da variação da I_m como decorrência de variação na DBP, na penetração. a) C25; b) CO ₂	76
Figura 5.8 - Efeito da corrente de arco na penetração, para o MIG/MAG convencional, em transferência metálica por curto-circuito em diferentes trechos de cada cordão. Dados correspondentes na Tabela 5.5.....	78
Figura 5.9 - Forma de onda desenvolvida para o CCC, com as fases adicionais (rampa1, rampa6 e fase 6). a) regularidade da transferência. b) detalhe da forma de onda (relativo a a)).	80

Figura 5.10 -	Comportamento da a) resistência e b) tensão do circuito de soldagem, na fase 3, e o momento de leitura de R_i e U_i , para vários curtos-circuitos (de 1 a 6) de um mesmo cordão, em pontos aleatórios do mesmo. Faz-se notar o momento da leitura dos sinais, em patamar estável. A escala T dos eixos y representa, ilustrativamente, o tempo.	81
Figura 5.11 -	Arquivo DIGI2000.0	83
Figura 5.12 -	Arquivo DIGI200R.0	83
Figura 5.13 -	Arquivo DIGI20TA.0, relativo ao tempo de arco. Reflete a regularidade do tempo de arco. N é o numero de ocorrências dentro do período monitorado. 84	84
Figura 5.14 -	Arquivo DIGI20TP.0, relativo ao período. Reflete a regularidade do período da forma de onda. N é o numero de ocorrências dentro do período aquisitado. 84	84
Figura 5.15 -	Arquivo DIGI20TC.0. Reflete a regularidade do tempo de curto-circuito. N é o numero de ocorrências dentro do período aquisitado.	85
Figura 5.16 -	Arquivo DIGI2TF3.0. N é o numero de ocorrências dentro do período aquisitado. 85	85
Figura 5.17 -	Arquivo DIGI2TF1.0. Reflete a regularidade do tempo da fase 1. N é o numero de ocorrências dentro do período aquisitado	86
Figura 5.18 -	Arquivo DIGI2TF4.0. N é o numero de reignições ocorridas na fase 4, propriamente, dentro do período aquisitado. a) muitas reaberturas de arco antes de 250 μ s, ou seja, ainda em corrente alta e b) maioria das reaberturas de arco em correntes baixas.	87
Figura 5.19 -	Gráficos de U por I, proporcionando uma avaliação da estabilidade do processo CCC. Em b) se encontra uma maior regularidade, o que é confirmado pelos oscilogramas correspondentes.	88
Figura 5.20 -	Leitura de U_i e R_i em patamar estável (azul) e já em rampa de subida (vermelho), desfavorecendo a detecção da reignição. A escala T do eixo y ilustra o tempo.	89
Figura 5.21 -	Tela do programa de controle, DIGI2000.	92
Figura 5.22 -	Forma de onda final, em um ensaio semi-automático.	92
Figura 5.23 -	Geração de respingos: a) MIG/MAG convencional por curto-circuito; b) CCC reignição em corrente alta; c) CCC, reignição em corrente baixa. Condições similares consideradas: mesma V_a e mesmo V_g	93
Figura 5.24 -	Efeito do volume de gota (mm^3) sobre a penetração (mm).	95
Figura 5.25 -	Potência instantânea ao longo do período de arco: $P_{instccc}$: potencia do CCC; $P_{instcccconv}$: potencia do MIG/MAG convencional.	96
Figura 5.26 -	Potência instantânea ao longo de um período de transferência, incluindo o curto-circuito. $P_{instccc}$: potencia do CCC; $P_{instcccconv}$: potencia do MIG/MAG convencional.	97
Figura 5.27 -	Geometria demandada por norma para o passe de raiz, admitindo-se mordedura de até 0,1 mm. T1 é ilimitado [94].	100
Figura 5.28 -	Geometria da seção transversal de: a) um passe de raiz executado com o CCC e b) o passe de raiz normalmente resultante do ER celulósico. [83]	101
Figura 5.29 -	Avaliação visual da nível de respingos de cada processo, na mesma operação: a) CCC e b) ER celulósico.	102
Figura 5.30 -	Oscilograma do CCC para a regulagem para CO_2 atingida.	104
Figura 5.31 -	Comparação da geração de respingos para a) CCC e b) MIG/MAG convencional, ambos com CO_2 puro como gás de proteção.	104

LISTA DE TABELAS

Tabela 2.1 - Valores do coeficiente de tensão superficial $\{\gamma\}$ do elemento ferro e sua taxa de variação com a temperatura $\{\zeta\gamma/\zeta T\}$ [20].....	19
Tabela 2.2 - Quantidade de hidrogênio difusível no metal de solda, de acordo com o gás de proteção e seu potencial de oxidação.[26]	23
Tabela 2.3 - Perda de elementos de liga (Si e Mn) por oxidação, em relação à composição original do arame. [26]	26
Tabela 2.4 - Tempos de curto-circuito para diferentes indutâncias, as quais são inversamente proporcionais aos coeficientes Ks e Kd. Estes traduzem, diretamente, a velocidade de atuação da máquina. Va=5 m/min, Uref=21 V. [88]	37
Tabela 4.1 - Análise da composição do gás de proteção, C-25.	61
Tabela 4.2 - Síntese dos ensaios realizados.....	66
Tabela 5.1 - Regulagens nos ensaios da Figura 5.1. Diâmetro do arame de 1,2 mm.	69
Tabela 5.2 - Comportamento dos tempos de curto-circuito: tccm=tempo de curto-circuito médio para cada DBP; tccmt geral, para cada gás; dpm=desvio padrão médio geral para cada gás; dpm%=desvio padrão médio relativo ao tccm.	70
Tabela 5.3 - Volumes médios de gota.	72
Tabela 5.4 - Volumes médios de gota, DBP de 8 mm a 15 mm.....	73
Tabela 5.5 - Dados dos ensaios da Figura 5.8.....	77
Tabela 5.6 - Pacote de arquivos de análise de dados, desenvolvido e incorporado ao sistema, para avaliação do CCC.	82
Tabela 5.7 - Cálculo do Volume médio de gota.....	86
Tabela 5.8 - Tempos de destacamento (tcc), tempo aparente de formação de estabilização da ponte líquida metálica (tponte) e tempo entre o início da estrição até a fratura da ponte (tfrat) para diferentes If3 e Vg semelhantes. Tempos em ms.	90
Tabela 5.9 - Regulagem prévia para verificação do processo.....	91
Tabela 5.10 - Quantificações de aporte térmico encontradas na literatura.	96
Tabela 5.11 - Tabela das potências médias nos tempos das duas figuras anteriores, no tempo de arco e no período de uma transferência de gota.	97
Tabela 5.12 - Tabela de dados dos ensaios acima.	98
Tabela 5.13 - Relacionamento entre DBP para a junta abordada e Ui lido no curso do CCC.....	99
Tabela 5.14 - Valores introduzidos no software de controle do CCC, gerando uma curva para determinação do tf5 em função da DBP.....	99
Tabela 5.15 - Comparação preliminar entre o CCC e o ER celulósico. Tempos para um passe de raiz de 350 mm de comprimento, na posição plana.	102
Tabela 5.16 - Regulagem do CCC para o CO ₂	103

SIMBOLOGIA

η - rendimento do processo
 ρ - resistividade do material
 θ - ângulo de transição entre o reforço da raiz e o material de base
 γ - tensão superficial
 ϕ - função de trabalho
 $[Ia^2.tma]_m$ - média da integral do valor quadrático da corrente, em um pulso
 $[\int Ia^2(t).dt]_m$ - média da integral do valor quadrático da corrente
 $\{\zeta\gamma / \zeta T\}$ - taxa de variação da tensão superficial com a temperatura
 a - raio da área deformada da ponte metálica
 API - American Petroleum institute
 Ar - Argônio
 ASME – American Society of Mechanical Engineers
 AT - Aporte térmico
 AWS - American Welding Society
 B - vetor campo magnético
 C - coeficiente de relação entre energia fornecida pelo arco e volume de gota
 C1 - constante para velocidade de arame
 C2 - constante para velocidade de arame
 C25 - gás de proteção 75% Ar 25% dióxido de carbono
 CCC - processo MIG/MAG em transferência metálica por Curto-circuito e Controle de Corrente desenvolvido neste trabalho
 CO₂ - dióxido de carbono
 Cp - corpo de prova
 Cv – energia de impacto obtida no ensaio Charpy
 DBP ou DBCP - distância entre o bico de contato e a peça
 De - diâmetro do arame-eletrodo
 dp% - desvio padrão percentual
 dpm% - desvio padrão médio percentual
 dU/dt - variação da tensão com o tempo
 ER - processo de soldagem Eletrodo Revestido
 f - força de Efeito Pinch
 F34 - gás de proteção 92% Ar 8% dióxido de carbono
 Farr - força de arraste plasma
 Fc - - fluxo de calor pelo centro da gota
 F_{LA} - componente axial da força de Lorentz
 Fp - fluxo de calor pela periferia da gota
 Fts - força de tensão superficial
 G - força de Efeito Pinch
 Hr – aquecimento por efeito Joule
 I - corrente
 Ia corrente de arco
 Iam - corrente média de arco
 Ief - corrente eficaz
 IGBT - Insulated Gate Bipolar Transistor
 Im - corrente média
 Ip - corrente de pulso
 Ipm - corrente média de pico

Kd - coeficiente de efeito indutivo de descida de corrente
Ks - coeficiente de efeito indutivo de subida de corrente
L - extensão de arame eletrodo (*stick out*)
La - comprimento de arco
m - permeabilidade magnética
MIG/MAG TMCCC - processo MIG/MAG em transferência metálica por curto circuito e controle de corrente, de maneira geral
Mn - manganês
N - número de ocorrências
Pinst cconv – potência instantânea no MIG/MAG convencional
Pinstccc potência instantânea no CCC
q - carga elétrica do portador de carga
Qcond - fluxo de calor por convecção
Qev - calor de evaporação
r - raio mínimo da ponte metálica
R - resistência elétrica
Ri - resistência inicial de monitoração da dinâmica da ponte metálica
Rig - resistência de detecção de reignição
Si - silício
Sla² - representação da integral do valor quadrático da corrente de arco
t - tempo
ta - tempo de arco
tcc - tempo de curto-circuito
tccm - tempo médio de curto-circuito
tccmt – tempo médio total de curto-circuito
tf - tempo das fases, no CCC
tfrat - tempo de fratura da ponte metálica, a partir do início da constrição
tp – tempo de pulso de corrente
tponte - tempo de formação da ponte metálica, até sua estabilização
U - tensão
Ua - tensão de arco
Ucc - tensão de curto-circuito
Ui – tensão inicial, lida para determinação da DBP
Uim - tensão inicial média
Um - tensão média
Uref - tensão de referência
Uri - tensão de reignição
Va - velocidade de arame
Vf - volume fundido
Vf_{tmt} – volume fundido no período de transferência
Vi – potencial de ionização
Vs - velocidade de soldagem

RESUMO

O presente trabalho consiste no estudo e desenvolvimento do Processo de Soldagem MIG/MAG em Transferência Metálica por Curto-circuito com Controle de Corrente (CCC), dedicado à execução do passe de raiz da solda de dutos, na construção *offshore* de linhas dutoviárias petrolíferas.

Atualmente, esta operação é realizada com o processo Eletrodo Revestido (ER), de características inferiores de produtividade. O processo aqui desenvolvido (CCC) provê uma operação semi-automática e sem escória, conferindo maior produtividade e, ao mesmo tempo, garantindo um passe de raiz com propriedades satisfatórias. Características técnicas e/ou econômicas inviabilizam, para o problema específico atacado, a aplicação das outras modalidades do MIG/MAG, quais sejam: pulsada, escoamento goticular axial (spray) e curto-circuito convencional.

Dada a significativa influência da soldagem sobre o cronograma e, então, sobre o elevado custo das obras, justifica-se o estudo e desenvolvimento desta tecnologia, no intuito de disponibilizá-la às empresas nacionais a baixo custo, incrementando sua competitividade num setor globalizado, como é o do Petróleo.

Experiências de laboratório e de campo, estas, conduzidas em uma Balsa de Lançamento de Dutos (BGL-1) a serviço da PETROBRAS, confirmaram a superioridade do MIG/MAG em relação ao ER, em termos de produtividade, na solda de dutos. Também se reportou a rápida adaptação dos soldadores ao MIG/MAG. Todavia, as soldas de raiz com o MIG/MAG convencional não resultaram satisfatórias, fato que reforçou o interesse do LABSOLDA no CCC. Frente a promissores resultados preliminarmente alcançados e relevância reportada pela indústria, decidiu-se pela continuidade do tema em um projeto de Mestrado.

O sistema desenvolvido, uma variante do MIG/MAG, obtém as vantagens da transferência metálica por curto-circuito e evita seus inconvenientes (sobretudo com alto CO₂ no gás de proteção), viabilizando seu uso no passe de raiz em dutos. Isso se consegue através do controle da corrente, imposta em uma forma de onda otimizada, proporcionando estabilidade ao processo de soldagem e à poça de fusão.

Como resultado, geraram-se potentes ferramentas de avaliação de estabilidade, dedicadas ao CCC. Aplicando-as, se determinou uma forma de onda, com os tempos de suas fases e respectivos valores de corrente, adequada para o passe em questão, produzindo soldas em conformidade com as normas incidentes e com produtividade superior ao ER. Notou-se, também, o pouco tempo de treinamento necessário ao soldador.

ABSTRACT

This work consists in the study and development of the Controlled Current Short-circuiting MIG/MAG Welding Process (CCC), dedicated to the root pass of pipes butt weld, for the construction of offshore oil pipelines.

Currently, this operation is performed with the Coated Electrode Process, of inherent low productivity. The semi mechanized, slag free process herein developed (CCC) yields satisfactory properties root welds with higher productivity. Technical and/or economical characteristics exclude, for the specific problem approached, the applying of other MIG/MAG methods, namely: pulsed current, dropping axial flow transfer (spray) and conventional short-circuiting.

Given the significant influence of the welding process over the chronogram, and then over the elevated construction costs, R&D on this technology is highly justifiable, since the aim is make it available to national companies at low cost, increasing their competitiveness in a globalized marketplace, as the oil sector.

Laboratory and field experiences made in partnership with PETROBRAS confirm the already expected productivity superiority of the MIG/MAG over the Coated Electrode in pipe welding. Also, quick welders' adaptation to the MIG/MAG was reported. Nevertheless, conventional short-circuiting MIG/MAG welded roots did not result satisfactory. This fact strengthened LABSOLDA's interest in CCC. In view of prominent results achieved and relevance reported by the industry, it was decided for the theme's continuity inside a Mastership project.

The developed system, a variant of the MIG/MAG Welding Process, obtains the vantages attributed to short-circuiting transfer, avoiding its inconveniences (mainly in pure CO₂ shielding), enabling its application in pipe welding root passes. This is possible via current control, featuring an optimized waveform, providing process and weld puddle stability.

As a result, powerful stability analysis tools, suited to the CCC, were generated. By applying them, a waveform was defined, whose phases' times and relative current levels are adequate to the mentioned weld pass, producing standards meeting root welds with higher productivity than the Coated Electrode. And last, but not least, very short welder training time was observed.

1 - Introdução

A origem da soldagem a arco elétrico remonta ao século XIX, com a utilização de eletrodos permanentes de carvão. O processo seguiu evoluindo até a invenção do Eletrodo Revestido, já no início século XX, inaugurando a era moderna da soldagem elétrica [1]. O advento da soldagem a arco protegido por uma atmosfera gasosa, que não advinda de revestimento no material de adição, pode ser rastreado à década de 1920. A escassez de recursos tecnológicos e pesquisa na área, no entanto, limitou a viabilidade econômica e comercial deste processo até a década de 1940. A partir de então, tendo como impulso inicial a II Guerra Mundial, o processo começou a ser pesquisado com ênfase [1,2].

O processo MIG foi originalmente patenteado nos EUA, em 1949, para soldagem de alumínio em atmosfera protetora de Hélio, mas teve sua introdução em escala industrial apenas na década de 1960 [3,12]. Sua evolução, que, devido às novas tecnologias de eletrônica de potência e/ou microprocessamento, bem exemplificadas pelas compactas fontes inversoras, tem sido cada vez mais vertiginosa, se baseia também na tendência à automatização, à proliferação de metais e suas ligas e à proliferação de normas [1]. Esses fatores não atuam isoladamente, mas sim, em conjunto. A competitividade no mercado demanda o maior grau possível de produtividade (automatização) das operações, as quais devem ter resultados satisfatórios, aplicando, para isso, materiais dotados de propriedades satisfatórias. Os processos de soldagem devem se adequar a esses materiais e alcançar a qualidade e características previstas em norma. Exemplos do exposto são as indústrias Aeronáutica e de Petróleo e Gás. No contexto dessa última se encaixa o presente trabalho, lançando mão de modernos equipamentos e técnicas de *software* dedicados à monitoração e ao controle da soldagem, com o intuito de se gerarem resultados que satisfaçam as rígidas normas para a solda de raiz na construção de tubulações e com vistas futuras à automatização desta operação.

A característica mais atraente inerente ao processo MIG/MAG é a produtividade que pode ser alcançada, advinda de seu cunho semi-automático e alta densidade de corrente, resultando em altas taxas de deposição e elevado fator de trabalho, flexibilidade e facilidade de automatização, mantendo-se a qualidade requerida em diversas aplicações. De fato, o processo MIG/MAG veio continuamente aumentando sua fatia do mercado de soldagem, tendo esta subido de 30% em 1974 para mais de 50% em 1984 (dados relativos a metal depositado), mantendo-se neste

patamar até pelo menos 1995, dados, estes, referentes à Europa, EUA e Japão [3][4]. Contudo, se encontram na literatura especializada informações que elevam este índice para cerca de 70 % [12]. Atualmente, o mercado da soldagem a arco nestas regiões, no entanto, apresenta certa estagnação, tendo atingido sua maturidade [5][6][15]. Este fato é agravado pelo surgimento de novas técnicas de união e revestimento, como os adesivos. No citado período, de 1974 a 1984, inclusive, houve uma retração no mercado de soldagem de 10% a 15%, para as mesmas regiões.

Surge, então, o desafio de se manter atuante e competitivo sob estas condições. Para isso, variantes inovadoras de processos clássicos têm sido introduzidas, assim como antigos projetos têm sido reinventados e reintroduzidos. Isto se viabiliza através dos crescentes avanços tecnológicos em diversas áreas: materiais, eletrônica, robótica, laser, *software*... Pode-se citar a integração de processos, gerando os chamados processos híbridos, como o MIG/Laser, o Plasma/MIG e o Plasma/Laser. E, compreendendo o tema deste trabalho, cita-se, também, a geração de novas técnicas e estratégias de controle do arco elétrico e da transferência metálica.

O mercado brasileiro da soldagem, porém, não apresenta o mesmo comportamento, pois não se trata de um país que desenvolva ou aplique a alta tecnologia da soldagem em larga escala [13,16], como os países citados acima, que são grandes centros de desenvolvimento tecnológico. De fato, no Brasil, estudos revelam tendências de redução anual de 2% a 3% no mercado do Eletrodo Revestido e de incremento anual de 15% a 20% para tecnologias mais atuais, como o MIG/MAG [14]. Os países do terceiro mundo, aliás, são os novos alvos das grandes companhias mundiais de soldagem, exatamente devido a esse cenário [6]. O LABSOLDA, no entanto, em sua filosofia de inovar tecnologicamente, junto à formação de conhecimento e pessoal especializado, segue gerando o estado-da-arte em termos de processos, procedimentos e equipamentos de soldagem, com resultados, por vezes, inéditos em âmbito global. Pode-se citar a soldagem Híbrida Plasma-MIG, projeto iniciado na Alemanha, a Soldagem Plasma com Adição de Pó, a Soldagem Submarina Molhada com Eletrodo Revestido, cujo equipamento desenvolvido está atualmente sendo aplicado em campo, e o objeto deste trabalho, a Soldagem MIG/MAG em transferência metálica por curto-circuito e controle de corrente. Verifica-se que se trata de variantes de processos clássicos ou, no caso do Plasma/MIG, da reinvenção de um processo iniciado, porém abandonado devido à

dificuldade de controle à época de sua invenção. Tecnicamente, a abordagem, agora, é muito mais sofisticada.

No caso do presente trabalho, se pretende introduzir a tecnologia gerada no setor de Petróleo e Gás. O LABSOLDA vem, ao longo do tempo, atuando intensamente nesta área, que é crucial para qualquer país produtor. Atualmente, cerca de 9% do PIB brasileiro provém desse setor (6% somente da PETROBRAS, segundo autoridades da ANP – Agência Nacional do Petróleo), contribuição esta que vem crescendo continuamente: em 1997, representava 2,7% do total, 3,1% em 98, 4,2% em 99, 5,3% em 2000, 5,9% em 2001, 6,8% em 2002 [31]. Várias contribuições científicas e tecnológicas têm sido geradas em parceria com o CENPES/PETROBRAS, e também em projeto financiado pelo fundo setorial CTPetro, além de projetos de menor envergadura, mas não menos relevantes, conduzidos por bolsistas de graduação e pós-graduação da ANP. Entre eles, dispositivos de automatização de soldagem, fontes de soldagem dedicadas, e processos de soldagem.

A aplicação vislumbrada do resultado desse trabalho consiste no passe de raiz em soldas de topo de dutos chanfrados para construção de *pipelines*. A eficiência na execução deste passe é considerada um fator chave, que determina a velocidade na qual a linha dutoviária é construída. Uma vez que a soldagem e a inspeção de juntas em dutos exercem influência significativa sobre o cronograma físico e, como decorrência, no custo das obras, que incluem aluguéis de equipamentos da ordem de dezenas de milhares de dólares por dia, otimizações nesta operação se tornam deveras atrativas para as empresas contratantes e executoras de serviços [7,8]. Não obstante a inerente menor produtividade, o ER vem sendo o processo de escolha para o passe de raiz. Razões para isso se mostram, principalmente, a tradição, o desconhecimento em relação à possibilidade de aplicação do MIG/MAG e a falta de uma interação eficiente entre o soldador e o engenheiro que tenta emplacar um novo processo [7,9,10]. E, neste caso, a sinergia entre o profundo conhecimento do engenheiro sobre o processo e a grande habilidade do soldador é fundamental, dada a complexidade relativa do processo e também a dificuldade da solda, a qual envolve um passe de raiz, na presença de diversas posições de soldagem e do balanço constante da embarcação, num caso particular. Essa e outras características da operação específica, discutidas adiante, proíbem o uso do MIG/MAG em outras de suas variantes, seja pela inviabilidade

técnica, seja pela econômica, que não a transferência metálica por curto-circuito com controle de corrente, como no CCC.

Ressalta-se que a produtividade tem grande importância, também, no caso de recuperação de tubulações danificadas, restaurando o abastecimento para os clientes da maneira mais rápida possível.

Outras aplicações consideradas são aquelas onde o controle da corrente, encontrado no CCC e não no MIG/MAG convencional, viabiliza ou, pelo menos otimiza o uso deste processo semi-automático em conjunto com misturas gasosas com alto teor de dióxido de carbono (CO_2), por exemplo na fabricação de auto-peças, de motores elétricos, na indústria naval, ou na soldagem de chapas finas.

Técnicas, estratégias e equipamentos para o controle da corrente na soldagem MIG/MAG em modo de transferência metálica por curto-circuito não constituem uma novidade, pois há referências acerca desse tema que datam de 1983 [72]. Inclusive, o tema já foi estudado neste laboratório, no âmbito de duas teses de doutorado, de onde surgiram as bases para o presente trabalho. Os objetivos, porém, permanecem, basicamente, os mesmos para as diversas abordagens: obtenção de maior regularidade na transferência metálica, redução de respingos e fumos e obtenção de características geométricas e metalúrgicas homogêneas. Também os fundamentos do curso da solda, ou seja, das formas de onda adotadas, são similares: manutenção da corrente em baixo nível no momento do contato entre a gota fundida e a poça de fusão, com a finalidade de se reduzir o nível de respingos e se formar uma ponte líquida estável, seguindo-se um surto de corrente que causa o estrangulamento desta ponte, propiciando a transferência definitiva da gota e, novamente visando-se um baixo nível de respingos e fumos, reduz-se a corrente na iminência do desprendimento. Algumas dessas teorias preconizam, então, um segundo surto de corrente, o qual tem como função a fusão da ponta do arame-eletrodo para formação da próxima gota metálica. A partir daí, e, aproveitando-se das possibilidades de controle hoje disponíveis, os sistemas se tornam mais eficientes e surgem novas funções, como o controle da penetração e controle do chamado aporte térmico.

Este trabalho visa, então, a partir do estudo da teoria do fenômeno da transferência metálica, abordada em seus vários aspectos, de diversas técnicas e estratégias de controle da transferência metálica através do controle da corrente na soldagem MIG/MAG em curto-circuito, e de experiências com aquelas adotadas, a obtenção de conhecimento e de um sistema real com a tecnologia CCC. A meta

futura é disponibilizar essa tecnologia, de maneira otimizada e a baixo custo, ao mercado nacional.

2 - Fundamentação Teórica

2.1 - Aquecimento e fusão do arame-eletrodo

Os processos de soldagem que se baseiam na fusão das partes a serem trabalhadas requerem, naturalmente, uma fonte calorífica que proveja a energia necessária para o aumento da temperatura até a mudança de estado físico e manutenção do material em estado líquido, até que a união se materialize. Nestes casos, a energia pode provir de uma reação química (ex.: combustão), de fenômenos físicos num gás (ex.: plasma e arco voltaico) ou de radiação (ex.: laser). Existem, também, os processos nos quais a fusão não está envolvida, como, por exemplo, na soldagem por fricção, também chamada soldagem por atrito, na soldagem por resistência elétrica, e na moderna soldagem stir (*stir welding*).

A soldagem MIG/MAG pertence ao primeiro grupo e, como citado anteriormente, vem passando por inovações que otimizam o processo de fusão (cuja fonte de energia calorífica é um arco voltaico num plasma) e a transferência metálica. Neste sentido, o entendimento dos fenômenos envolvidos é necessário, quando o intuito é obter um grau satisfatório de domínio sobre os mesmos, como é o caso desse trabalho.

2.1.1 - O arco voltaico e sua contribuição para a fusão do arame eletrodo

Apesar de inúmeros estudos acerca do arco elétrico no campo da Física, não existe uma congruência quanto a aspectos como sua formação, seu comportamento, características térmicas e influência no processo, principalmente no que tange à soldagem com eletrodo consumível. Por exemplo, temperaturas de 6727° C, 9726° C, e uma faixa de 6000° C a 12000° C são citadas por diferentes autores para o plasma formado, sendo que esses valores podem se referir ao centro do arco e a um processo específico, ou podem ser mais generalistas, dependendo do autor [17,18,19].

Quanto à formação do arco, a região catódica assume grande importância no processo MIG/MAG, pois é dela que emergem os elétrons que fluem pelo arco, sendo responsáveis por grande parte da condução da corrente de soldagem, dependendo dessa relação, porém, da polaridade utilizada [19]. A capacidade de emissão de elétrons pelo cátodo, geralmente constituído pela peça no processo MIG/MAG, depende da função de trabalho e da temperatura do mesmo [17,19,20].

Surgem diferentes teorias sobre os mecanismos de liberação de elétrons para o arco e aquecimento desse eletrodo.

Aços estruturais se vaporizam antes de chegar à temperatura que ocasionaria liberação de elétrons, num efeito chamado emissão termiônica. Dessa maneira, a estrutura que alimenta o arco com os elétrons necessários a sua subsistência é a camada óxida presente na superfície do cátodo, pois esta exige menos energia para a liberação de elétrons [20]. Lesnewich [19] também cita essa explicação. Além disso, esse autor estratifica a corrente total de soldagem em corrente conduzida por íons positivos, provindos de metal vaporizado e dissociação do gás de proteção, e corrente conduzida por elétrons, provindos do cátodo. Essers [21] tem outra visão para esse tema, considerando a liberação de elétrons para o arco por emissão termiônica do metal puro e emissão de campo, esta última também mencionada por Lesnewich. Ele conclui, então, que nenhum desses fenômenos contribui significativamente para o fornecimento de elétrons, porém, não cita um possível mecanismo para isso. Já Kou [70] considera apenas a emissão de campo, fenômeno que não causa resfriamento do cátodo, descartando a emissão termiônica.

O aquecimento da região catódica se dá, principalmente, pela ação dos íons incidentes. Estes são acelerados ao atravessar o campo elétrico de mesma carga (positiva), que se forma e se mantém sobre o cátodo, e essa energia cinética é entregue na colisão dos íons com o cátodo. Esses íons também entregam energia quando são neutralizados na superfície catódica. Energia é perdida pelo cátodo pela liberação dos elétrons que mantém o arco e pela neutralização dos íons positivos por elétrons.

Energia também é trocada por outros mecanismos, como convecção, radiação e reações químicas de oxidação [19,21]. Questões acerca do aporte térmico serão analisadas posteriormente.

Em relação ao ânodo, comumente o arame eletrodo do processo MIG/MAG, Baixo [20] cita a formação da Barreira de Langmuir, pelo gradiente de concentração de elétrons que se forma nas proximidades da superfície do eletrodo, responsável pela aceleração dos elétrons, os quais entregam sua energia cinética e de condensação ao ânodo. Já Lesnewich [19] afirma que, devido a sua alta temperatura, o ânodo acaba fornecendo elétrons para o arco, os quais não têm energia suficiente para vencer as forças atrativas do próprio eletrodo. Forma-se, com isso, uma nuvem eletrônica nas proximidades da superfície anódica, se desenvolvendo entre ambas um alto gradiente de tensão, acelerando os elétrons

provindos do arco, e que atravessam a barreira eletrônica, em direção ao ânodo. A forma de transferência de energia é a mesma citada por Baixo [20], ou seja, energia cinética e de condensação, quando os elétrons são absorvidos pela superfície metálica. Há, também, a teoria de que agentes do meio de proteção (gás ou revestimento) anulam a barreira eletrônica, permitindo que os elétrons do cátodo bombardeiem o ânodo.

Considerando-se o arco de soldagem MIG/MAG, este apresenta comportamento análogo a um condutor metálico, ou seja, a queda tensão que nele ocorre aumenta em proporção constante com a corrente de soldagem. Investigações realizadas no LABSOLDA com o processo MIG/MAG convencional por curto-circuito mostraram este fato, como visto na Figura 2.2, relativa ao oscilograma real da Figura 2.1, de onde se considera apropriada a utilização da expressão:

$$V_a = C_1 \times I_{ef}^2 + C_2 \quad (1)$$

(determinada, estatisticamente, por Baixo [20]) para a velocidade alimentação de arame (V_a). C_1 é uma constante está relacionado com a resistência elétrica imposta pela extensão de eletrodo, C_2 depende da área transversal do arame e I_{ef} é a corrente eficaz. Na verdade, C_1 embute o calor gerado por efeito Joule e também o gerado na interface arco gota, ou seja, ainda que, numa situação hipotética, a extensão do eletrodo fosse 0,0 mm, C_1 não assumiria valor nulo [20]. A Figura 2.3 mostra curvas encontradas para algumas configurações de soldagem.

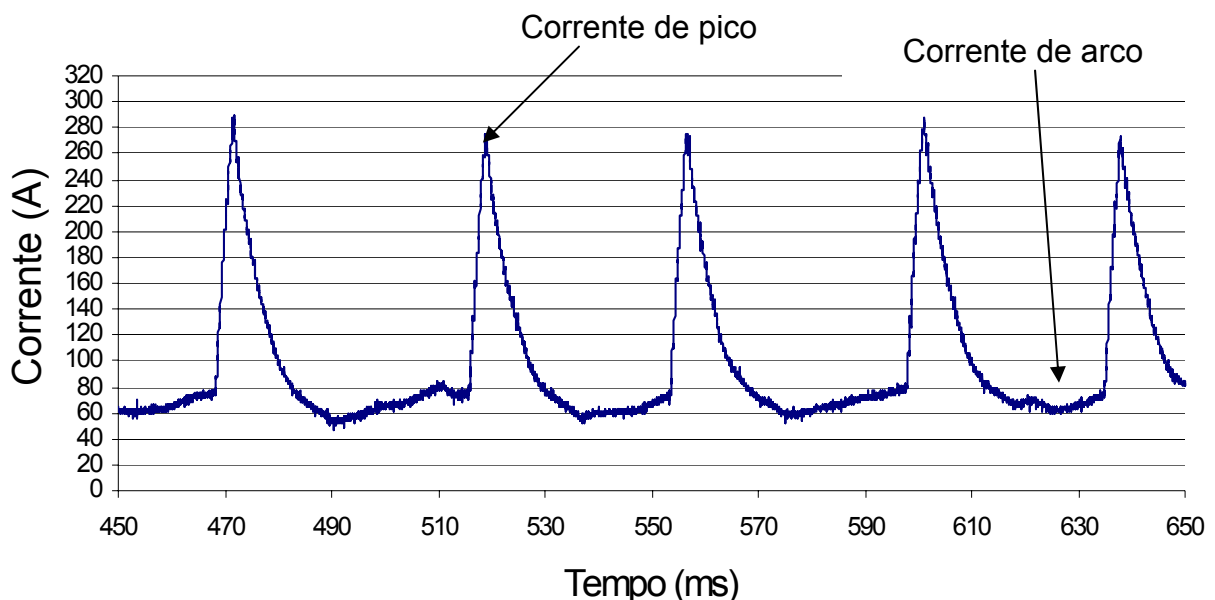


Figura 2.1 - Oscilograma de uma solda MIG/MAG convencional, em transferência por curto-circuito ($U_{ref}=23$ V, $V_a=4$ m/min, $K_s=K_d=20$, $D_e=1,0$ mm).[88]

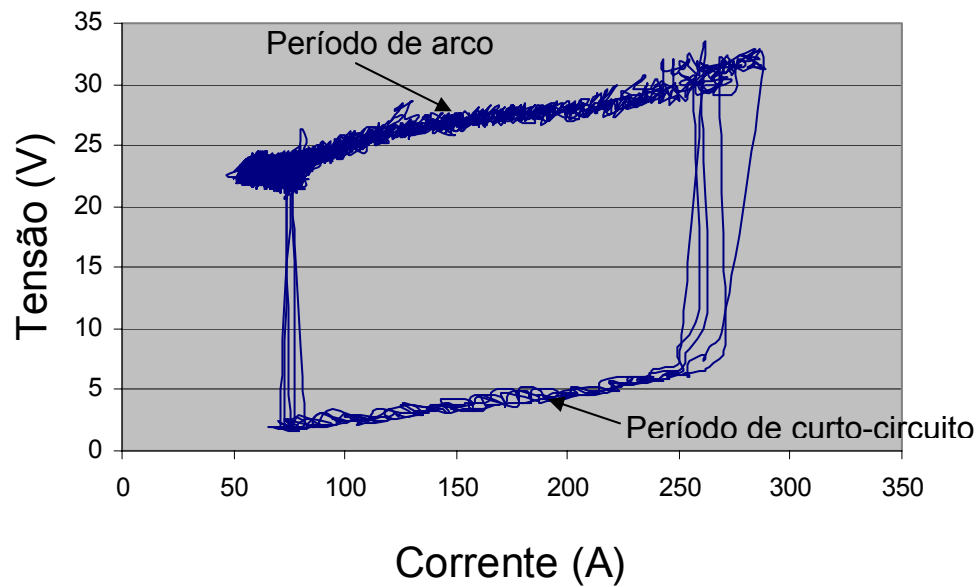


Figura 2.2 - Relação entre tensão e corrente construída a partir da seqüência de períodos de transferência da Figura 2.1. [88]

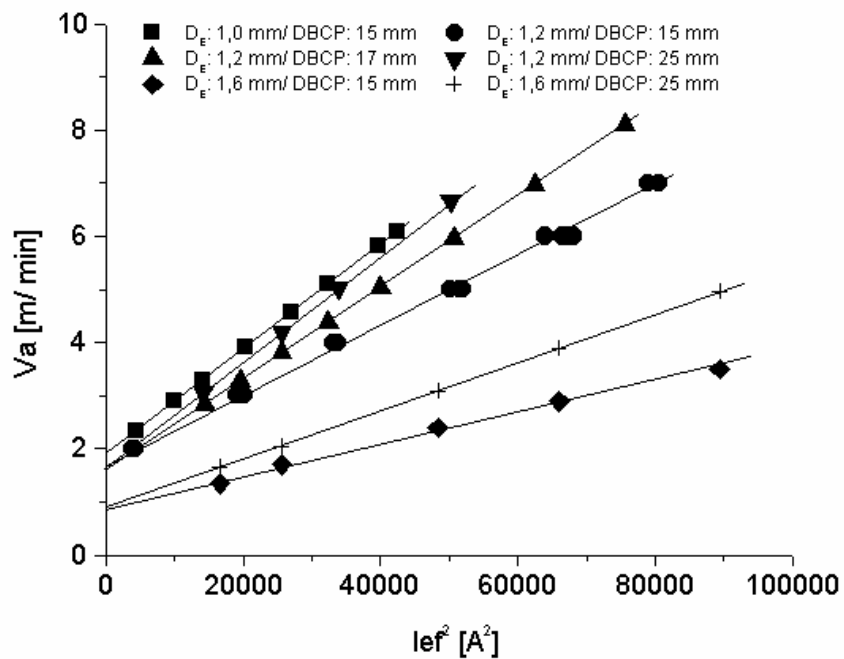


Figura 2.3 - Efeito da Distância Bico de Contato-Peça (DBP) e do diâmetro do eletrodo $\{D_E\}$ sobre o posicionamento da curva $\{V_a = C_1 \cdot I_{ef}^2 + C_2\}$. [20]

A radiação do arco é citada como fonte de energia para a fusão do eletrodo [21]. No entanto, experiências de Lesnewich [19] indicam que a contribuição desta componente não é considerável.

2.1.2 - A contribuição do Efeito Joule na extensão de arame-eletrodo sólida (*stick out*) para o aquecimento

O entendimento deste aspecto é de fundamental importância para o desenvolvimento do presente trabalho, uma vez que um dos objetivos do sistema de controle da forma de onda de corrente de soldagem é a homogeneização da energia fornecida ao arame pelo arco e pelo efeito Joule no arame, de modo a manter a regularidade da transferência metálica.

A potência ôhmica gerada ao longo da extensão sólida do arame-eletrodo (L , na Figura 2.4) não é suficiente para a fusão do arame eletrodo. A componente de calor transmitida por condução da frente de fusão (Q_{cond}) (Figura 2.4) para o arame pode ser desprezada [17].

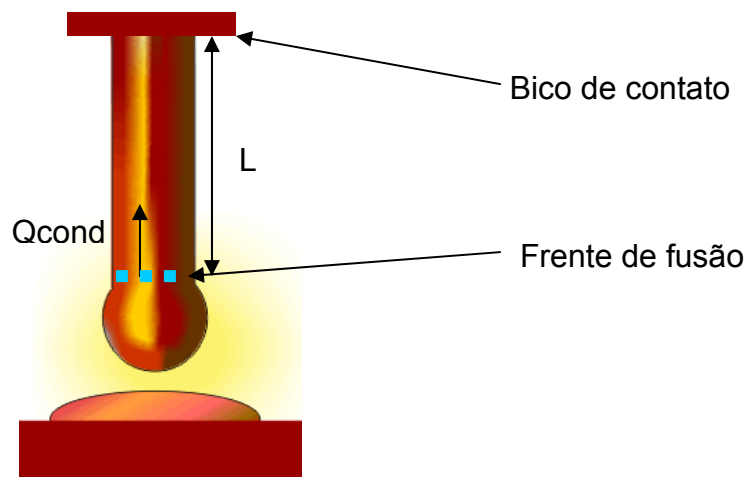


Figura 2.4 - Aquecimento da extensão sólida do arame-eletrodo (*stick out*)

Como citado acima, parte do calor necessário para a fusão do arame eletrodo (Q_t) é fornecida pelo arco elétrico, sendo esta distribuição entre ambas as fontes (arco elétrico e Efeito Joule) dependente da corrente e da extensão do eletrodo. O aumento em um desses valores acarreta aumento da contribuição do outro, reciprocamente [17,19,20]. Isto é demonstrado nas Figuras 2.3, 2.5 e 2.6.

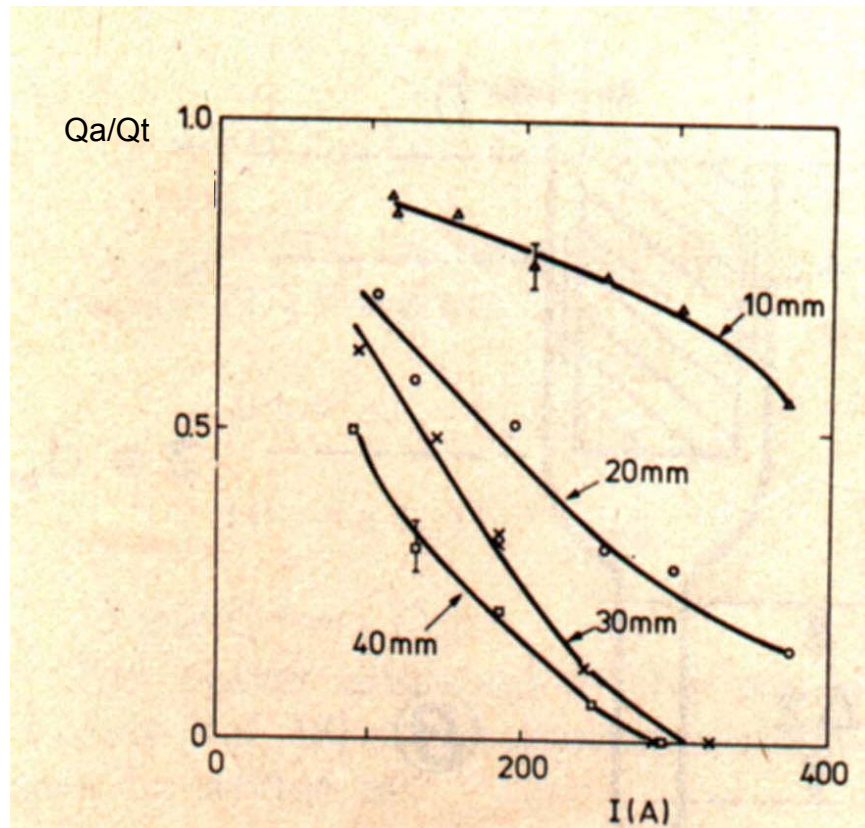


Figura 2.5 - Contribuição do calor através da gota (originado na interface gota/arco) ao calor total para a frente de fusão, para diferentes L ($De=1,2$ mm). [17]

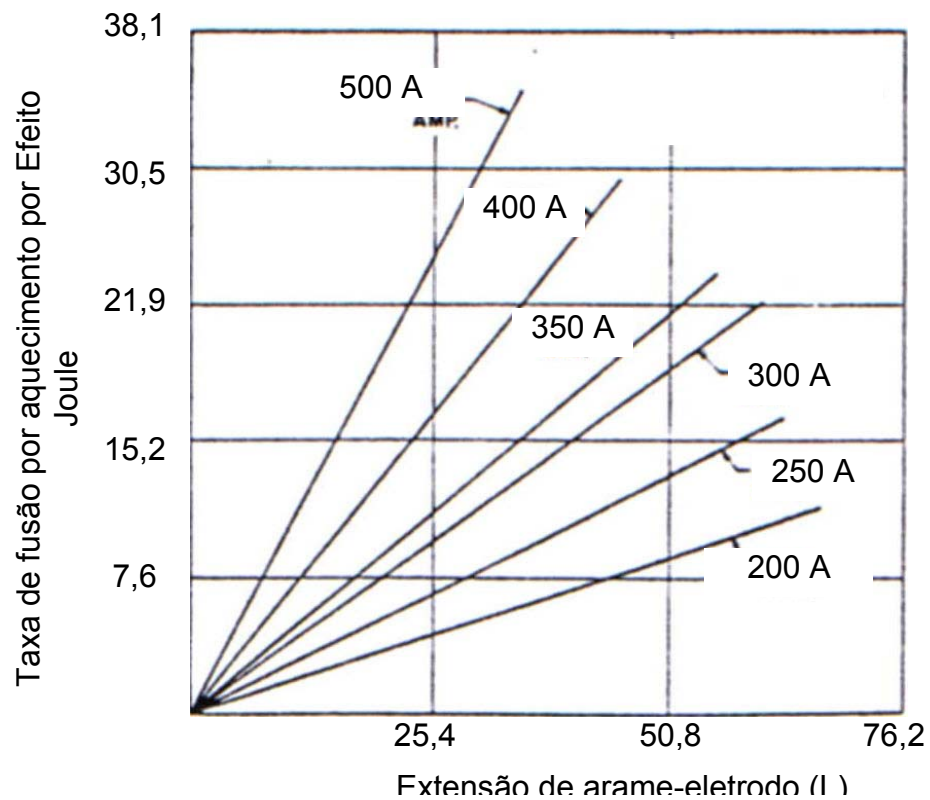


Figura 2.6 - Efeito da corrente e da extensão de arame-eletrodo (L) na taxa de fusão (velocidade de arame, V_a) ($DE=1,2$ mm). [19]

O aquecimento por efeito Joule (Hr) é dado por

$$Hr = \rho \times (L/A) \times I^2. \quad (2).$$

Ou seja, esperar-se-ia detectar um aumento progressivo na taxa de fusão com o aumento da extensão do eletrodo, e não uma relação linear desta com aumento de L, pois ρ (resistividade do material do arame) é dependente da temperatura do eletrodo. Todavia, na verdade, a temperatura do arame eletrodo ao longo de L pode ser considerada constante, e um incremento na velocidade de arame é necessário para se manter o processo, fazendo que cada unidade de volume de arame eletrodo seja submetida àquela corrente por um tempo menor, equalizando a quantidade de calor gerada [17,19]. O caso do MIG/MAG convencional, no qual a corrente é livre, será abordado no item 2.5.2.

O aquecimento por efeito Joule da extensão do eletrodo (L) acaba sofrendo variações devidas à não garantia da retenção do ponto de contato elétrico entre o bico de contato e o arame, o que modifica sua real extensão. Alguns autores recomendam técnicas para minimizar esse efeito, como o uso de um anel de alumínio interno ao bico de contato, ou o uso de um bico de contato especial, dotado de uma curvatura, levando a um contato forçado [24,25]. Para as aplicações de até agora abordadas pelo LABSOLDA, no entanto, a correta montagem da tocha, o uso de bicos de contato adequados e não desgastados e arames não excessivamente oxidados têm se mostrado suficientes.

2.2 - Modos de transferência metálica – Curto-circuito e Corrente Pulsada

Uma das mais relevantes características de processos de soldagem a arco nos quais há adição de material é a forma em que se dá a transferência desse material para a peça a ser soldada. O modo de transferência influi grandemente a eficiência de deposição, a qualidade estética e estrutural da junta realizada, a geometria da solda, as formas pelas quais cada operação pode ser realizada, o aporte térmico ao material de base, entre outros aspectos relacionados. Como consequência, o modo de transferência determina, junto a outras variáveis e parâmetros de soldagem, os custos e a produtividade alcançada nas operações produtivas adotadas nas empresas.

O processo MIG/MAG utiliza eletrodo consumível e o modo de transferência do mesmo para a peça é determinado por uma conjunção de fatores. Considerando-se a acima citada importância do modo de transferência para o resultado da solda e a influência dos fatores determinantes, o controle dessa característica é objeto de estudos em varias linhas de pesquisa do LABSOLDA, como a soldagem pulsada e o tema deste trabalho, o CCC. Neste sentido, se enfatizam abaixo os modos de transferência por corrente pulsada e por curto-circuito convencional, cujas bases constituem também os fundamentos do CCC.

O modo conhecido como globular, por ser citado pela literatura como indesejável e a ser evitado na produção, será desconsiderado neste trabalho, como já foi feito no Projeto de Dissertação de Mestrado. Razão para isso é a instabilidade generalizada observada nesta situação [26,27,28,29].

2.2.1 - Formação da gota metálica

Sendo a razão de uma das fases existentes na forma de onda da maioria dos sistemas de transferência metálica por curto-circuito com controle de corrente estudados e também do aqui desenvolvido, o mecanismo de formação da gota metálica deve ser entendido, para que seu dimensionamento seja adequado.

O arame, como mencionado anteriormente, é aquecido ao longo de sua extensão por efeito Joule, não bastando essa componente para fundi-lo. Assim, um volume unitário de arame chega à frente de fusão (Figura 2.4) previamente aquecido, onde recebe uma quantidade adicional de energia, proveniente do arco, somando-se o total necessário para a fusão do material [17]. O líquido formado, sob a atuação da tensão superficial, tende a se tornar uma esfera, a gota metálica [51].

No caso abordado, o arco, definido anteriormente como de coluna altamente constricta, não incide diretamente na frente de fusão, mas na superfície inferior das gotas que se formam sucessivamente. Portanto, o calor gerado na interface arco/gota (menos a energia de evaporação Q_{ev}) é transmitido indiretamente para o metal sólido da frente de fusão. Em relação à transferência metálica por curto-circuito, essa transmissão é realizada por convecção.

O perfil geométrico de distribuição do fluxo de corrente através da gota impõe um perfil de velocidades no líquido que compõe a mesma, no qual o material da região central do interior da gota, é impelido em direção ao arco no eixo do arame, enquanto o líquido que se encontra na interface arco/gota é impelido para a frente de fusão, fluindo pela superfície da gota (Figura 2.7) .

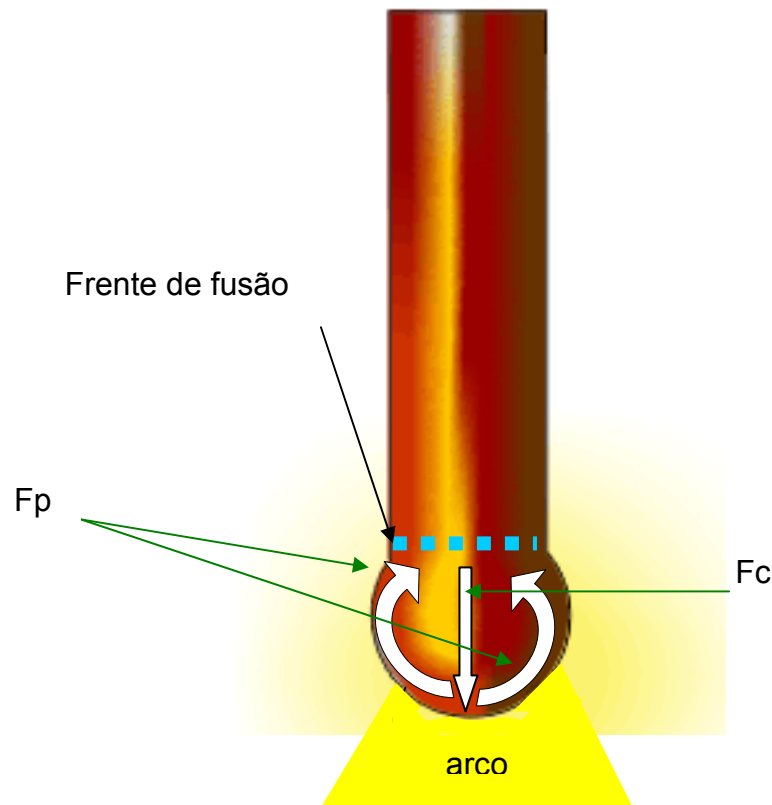


Figura 2.7 - Transferência de calor da interface arco/gota ($Ha-Q_{ev}$) para a frente de fusão: convecção. Perfil do fluxo de material: F_p : fluxo na periferia, F_c : fluxo central.

O calor absorvido na interface é, então, entregue ao arame sólido previamente aquecido. Certa quantidade de calor é transferida por condução para a extensão de arame sólido anterior à frente de fusão, mas tanto a quantidade, quanto a extensão atingida por essa porção podem ser desprezados [17].

Em processos onde se objetiva um melhor controle da transferência metálica, a forma de fornecimento de energia para o arame exerce grande influência. Exemplos são o MIG/MAG em corrente pulsada e o objeto desta pesquisa, o CCC. Em todos eles, se projetam as formas de onda de energia para que se obtenha um dimensionamento adequado das gotas transferidas [27,28]. Naturalmente, em condições reais, esse volume varia, pois há vaporização metálica, a configuração da solda se modifica e outras perturbações, assim como a gota também não é perfeitamente esférica. Isto, porém, não proíbe que resultados satisfatórios sejam alcançados, mostrando a robustez dos processos quando, naturalmente, os procedimentos são bem desenhados.

No processo MIG/MAG em corrente pulsada, em baixas correntes médias e com uma gota por pulso, a dimensão da gota a ser transferida é,

predominantemente, determinada pelas características do pulso, exercendo a fase de base apenas a função de manter o arco elétrico e o aquecimento da poça metálica [28,27]. Ressalva-se, porém, que há, apesar de em escala bem inferior, fusão também na fase de base.

A expressão

$$V_f = C \times I_p^2 \times t_p \quad (3)$$

foi estabelecida e é normalmente utilizada para o dimensionamento da gota no processo MIG/MAG em corrente pulsada, onde V_f é o volume da gota, I_p é a corrente de pulso e t_p o tempo em que ela é imposta. Baixo [20], em seu trabalho, verificou a validade de uma expressão como essa também para o caso da transferência metálica por curto-circuito convencional (controle de tensão) e com controle de corrente (Figura 2.8 e Figura 2.9, respectivamente), numa relação linear entre o V_f e a energia entregue no tempo de arco, no qual a gota é formada, quantificada pela integral da corrente pelo tempo na fase de arco.

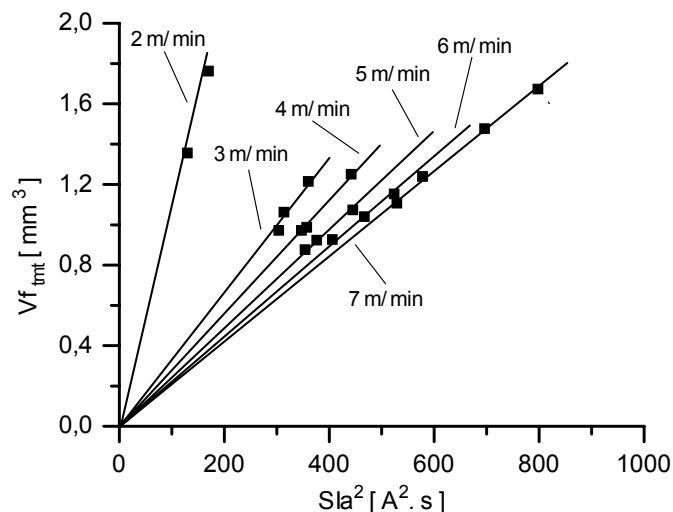


Figura 2.8 - Relação entre o volume da gota fundida $\{Vf_{tmt}\}$ e o valor da integral da corrente na fase de arco $[Ia^2(t).dt]_m$, representado no gráfico por (Sla^2) . [20]

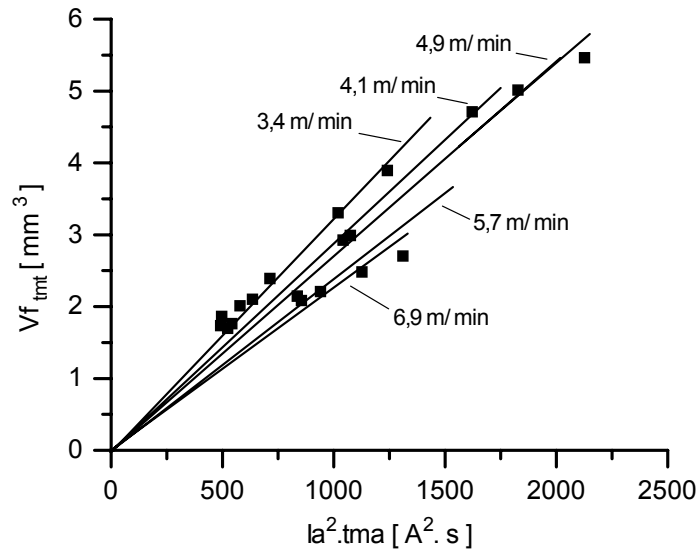


Figura 2.9 - Relação entre o volume da gota fundida $\{Vf_{tmt}\}$ valor da integral da corrente na fase de arco $[Ia^2.tma]_m$. [20]

Ressalta-se que a indutância do circuito de soldagem e as características dinâmicas da fonte de soldagem devem ser cuidadosamente observadas, pois delas depende a real quantidade de energia que surge quando se estabelecem as variáveis pela expressão (5) [67,89]. Este fato deve ser levado em consideração principalmente em problemas como o tratado neste trabalho. Dada a agressividade usual do ambiente petrolífero, costuma-se posicionar os equipamentos em lugares protegidos, que podem ser afastados da solda a ser realizada, aumentando a indutância do circuito pela extensão dos cabos. Baixo [8] determinou que, caso a indutância do circuito se mantenha na faixa de $60 \mu H$ a $80 \mu H$, é possível que o CCC seja empregado, mesmo com extensão de cabos entre 50 m e 100 m.

Em se tratando do processo MIG/MAG com arame-eletrodo negativo ou em transferência por projeção goticular axial, os mecanismos de aquecimento e formação da gota envolvidos diferem [4,17,23]. Esses casos não serão abordados neste texto.

2.2.2 - Forças envolvidas na transferência metálica

Ao longo de sua formação, e de acordo com a configuração da solda, o metal líquido a ser transferido do arame-eletrodo à peça está submetido a forças, assim como também o está a poça de fusão. Tais forças têm considerável influência no

resultado, contribuindo na determinação do modo e dinâmica da transferência metálica e das características da solda, como a penetração. Desta maneira, o entendimento dessas forças é de interesse para o desenvolvimento de um método distinto de soldagem, como o é o CCC, pois as forças e sua influência também podem ser distintas em relação aos processos usuais, já profundamente estudados.

Como a própria designação afirma, o arame-eletrodo do processo MIG/MAG conduz corrente elétrica e, assim, está submetido, ao longo da extensão sólida do eletrodo, à força eletromagnética que surge em decorrência deste fluxo. Todavia, é a porção líquida, portanto deformável, a partir da frente de fusão, que sente e responde à atuação desta e das outras forças.

Um condutor de corrente, como por exemplo o arame-eletrodo, a gota metálica formada e o próprio arco voltaico, pode ser visto como vários pequenos condutores (na realidade linhas de campo percorridas por portadores de carga) e o fluxo de partículas de carga ao longo dos mesmos pode ser comparado a uma corrente elétrica. Em assim sendo, surge uma força sobre as cargas, direcionada para o centro do macro-condutor, decorrente da interação entre os campos elétricos, chamada Força de Lorentz, dada por

$$FL=q \times V \times B \times \text{sen}\theta \quad (4),$$

onde q é a carga elétrica do portador, V o vetor velocidade da carga, B , o vetor campo magnético e θ o ângulo entre ambos.

Quando há variação na seção circular do macro-condutor, como a que ocorre entre a frente de fusão e a interface arco-gota, esta força é dotada de uma componente axial, a qual é determinante em relação à transferência metálica (Figura 2.10).

A componente radial desta força, sempre direcionada para o centro do condutor, é conhecida como Efeito Pinch, igualmente importante no transcurso da transferência metálica no processo MIG/MAG [74]. A componente axial da Força de Lorentz pode atuar a favor ou contra o destacamento da gota, mas sempre no sentido de aumento da área do condutor (Figura 2.10), enquanto o Efeito Pinch é responsável pela constrição da ponte metálica líquida adjacente ao eletrodo sólido, normalmente favorecendo o destacamento.

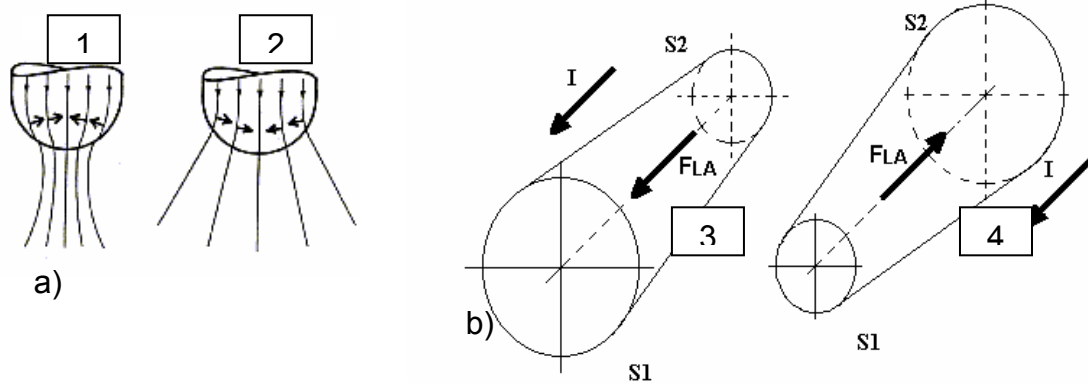


Figura 2.10 - Atuação da Força de Lorentz, originada pelos campos eletromagnéticos na soldagem MIG/MAG: a) desmembramento da força em componente axial e longitudinal; b) atuação da componente longitudinal (F_{LA}). a)1 e b)4 são correspondentes, caracterizando uma F_{LA} contrária ao destacamento da gota. Já a)2 e b)3 caracterizam uma resultante F_{LA} a favor do destacamento. [20]

Dadas a equação (4) e a Figura 2.10, a atuação força de Lorentz depende da corrente elétrica e das características geométricas de seu fluxo [59]. Essa dependência é corroborada por Stava [51], no trabalho em que abordou a transferência metálica por curto-circuito. pela expressão:

$$G = I^2 \times (R^2 - r^2) / (100 \times \pi \times R^4) \quad (5),$$

a qual mostra, ainda, que a intensidade do Efeito Pinch (G) é proporcional ao quadrado da corrente e tanto maior, quanto menor o raio do condutor, para a mesma corrente. Ou seja, a densidade de corrente também é fator determinante. Nesta expressão, R é o raio do arame-eletrodo e r é o raio da ponte líquida (portanto variável) [47,51]. Uma outra expressão para a intensidade do Efeito Pinch (f) é dada por Slania [74]:

$$f = 10 \times 2 \times m \times I^2 / 4 \times \pi^2 \times a^2 \quad (6),$$

onde m é a permeabilidade magnética do material, a é o raio da área deformada e I a corrente.

A força de Lorentz também aparece quando se trata dos raios anódicos e catódicos, os quais concentram a corrente elétrica momentaneamente em pontos específicos do eletrodo, podendo atuar no sentido de reter a transferência da gota metálica [24,20].

Outra força citada pela literatura é a força de arraste do jato plasma, causada pela diferença de pressão entre a região da interface arco/gota e a região da interface arco/peça. Há controvérsias em relação à contribuição desta força na transferência metálica, que se tornaria importante nos modos de transferência em voo livre, ou seja, sem que haja curto-circuito [74,24]. Também, alguns autores creditam à influência desta força sobre as gotas a forma tomada pela penetração da solda, mas isso é contestado por outros [58]. Por outro lado, a contribuição direta do jato plasma na redução da espessura da poça de fusão, e conseqüente variação da penetração neste modo transferência é citada na literatura [51], e, de acordo com resultados encontrados no LABSOLDA, há motivos para isto seja investigado.

A força da Tensão Superficial tem incontestável importância ao longo de todo o processo de transferência, seja qual for o modo. Na coexistência de dois meios diferentes, a região de contato entre ambos é caracterizada por uma camada de átomos que estão submetidos a uma força direcionada ao interior do volume a que pertencem. Esta força atua no sentido de reduzir ao mínimo a energia superficial livre, o que no caso de líquidos, os leva a assumir a forma esférica, que é a de menor área superficial para um determinado volume [57]. No caso da soldagem MIG/MAG, a força da tensão superficial tende a reter a gota metálica ao eletrodo [74] dando a ela a forma esférica, e, quando há curto-circuito entre a o arame eletrodo e a peça através da gota metálica, esta é puxada pela tensão superficial da poça metálica para si, fato que dá origem ao nome comercial adotado pela empresa Lincoln para seu processo similar ao CCC, o chamado STT (*Surface Tension Transfer*, ou transferência por tensão superficial) [49][51]. A intensidade desta força depende da temperatura do material e de sua composição química [4][20]. A Tabela 2.1 mostra o coeficiente de tensão superficial do Ferro e sua taxa de variação com a temperatura, numa relação não linear.

Tabela 2.1 - Valores do coeficiente de tensão superficial $\{\gamma\}$ do elemento ferro e sua taxa de variação com a temperatura $\{\zeta\gamma/\zeta T\}$ [20]

T [C]	γ [dina/ cm]	$\zeta\gamma/\zeta T$ [dina/ cm.C]
1535	1500 – 1800	- 0,5
1780	1400	-2.8
1850	1250	-2.8
1900	1100	-2.8

Existem, na realidade, gradientes de temperatura na superfície da gota metálica, assim como a composição química na mesma também não é homogênea, causando variações na tensão superficial. Todavia, estes fatores são desconsiderados no estudo da soldagem devido a sua complexidade e baixa relevância prática.

Em relação à força peso, apesar de estar sempre presente, sua contribuição é tida como irrelevante, principalmente para o caso da transferência metálica por curto-circuito, em relação às outras forças atuantes [59].

Cada uma das forças descritas atua no sentido de favorecer ou dificultar (determinantemente ou não) a transferência da gota formada da extremidade do arame-eletrodo para a peça. A teoria mais aceita para a determinação do modo de transferência considera um balanço destas forças atuando no sistema. De um modo geral, quando a soma das forças favoráveis ao destacamento sobrepuja aquelas contrárias ao mesmo, a gota é destacada e impelida em direção à peça. Considerando o exposto acima, este balanço é, de forma geral, assim equacionado:

$$F_{ts} = F_{LA} + F_{arr} + F_p \quad (7),$$

onde F_{ts} é a força da tensão superficial, F_{LA} a componente axial da força de Lorentz, F_{arr} é a força de arraste e F_p a força peso. Nota-se que não está considerado o efeito dos jatos catódicos e anódicos. Esta relação determina, de fato, um ponto de operação no qual a transferência metálica se dá sem curto-circuito, na chamada transferência em vôo livre. Este ponto é determinado pela corrente de soldagem, a qual é conhecida por corrente de transição. Há, ainda, uma segunda teoria, chamada de Instabilidade Pinch, para o momento de transição [24,20]. A mais aceita, no entanto, é a primeira.

Em relação à transferência metálica por curto-circuito convencional e CCC, a questão das forças será mais profundamente abordada a seguir.

2.3 - Gases de Proteção

2.3.1 - Função

Essencialmente, os gases utilizados na soldagem MIG/MAG têm como função a proteção (daí o nome) do material fundido contra elementos da atmosfera que possam comprometer a integridade da solda efetuada. Eles formam uma barreira física contra o acesso de, principalmente, oxigênio, nitrogênio e hidrogênio,

reduzindo a susceptibilidade à formação de poros, excesso de óxidos, nitretos, inclusões e trincas a frio, todos prejudiciais a resistência da junta soldada [35,63]. Para que isso seja conseguido, o fluxo de gás de proteção na ponta da tocha deve ser adequado, evitando o escoamento turbulento, e não deve haver orifícios que permitam entrada de ar no fluxo. Ambos permitiriam a chegada de ar atmosférico na poça. Na realidade, a importância dos gases utilizados na soldagem MIG/MAG se estende à própria viabilidade de realização do processo, pois deles depende a própria subsistência do arco elétrico de maneira coerente. Ao serem aquecidos e submetidos à tensão entre os eletrodos, os gases se dissociam liberando íons, necessários à formação do plasma e condução da corrente. São enfatizados, neste texto, misturas de Argônio (Ar) e Dióxido de Carbono (CO₂) e o CO₂ puro, que são os gases mais aplicados em problemas como o aqui atacado.

Outra função importante assumida pelos gases na soldagem MIG/MAG de aços diz respeito à estabilidade do arco (cujo conceito será mais bem abordado a seguir). Gases oxidantes são adicionados para que se forme uma película óxida sobre a poça fundida, propiciando a chamada estabilização dos pontos catódicos [20,26,35]. Caso contrário, o arco é alimentado de elétrons advindos das bordas da poça aleatoriamente, o que está relacionado à queda de estabilidade do arco. Este fato é identificado pelo aparecimento de ataque eletroquímico nesta região [20].

2.3.2 - Efeitos

Muitas vezes citados como funções dos gases, os efeitos que os mesmos causam no processo não são assim considerados, pois as características do processo e do resultado vão depender não apenas da composição dos gases, mas de toda a configuração do procedimento, incluindo vários outros parâmetros de soldagem.

Para exemplificar o exposto, cita-se o efeito do gás CO₂ de restringir o arco e, conseqüentemente, causar uma redução de área da interface arco-gota, em comparação com outra mistura mais pobre em CO₂, em regulagens de processo semelhantes. Este comportamento se deve a maior condutividade térmica do CO₂, e tende a originar uma força na gota em sentido contrário ao seu destacamento, o que, por sua vez, tende a levar o processo ao modo de transferência por curto-circuito [4,20,26]. No entanto, não se pode afirmar que é função do CO₂ definir o modo de transferência de determinada solda, pois isso dependerá, principalmente,

da variável corrente. Esta força é a razão pela qual também há maior tendência a respingos, conforme o aumento de CO₂ no gás (Figura 2.11) [2,60,62].

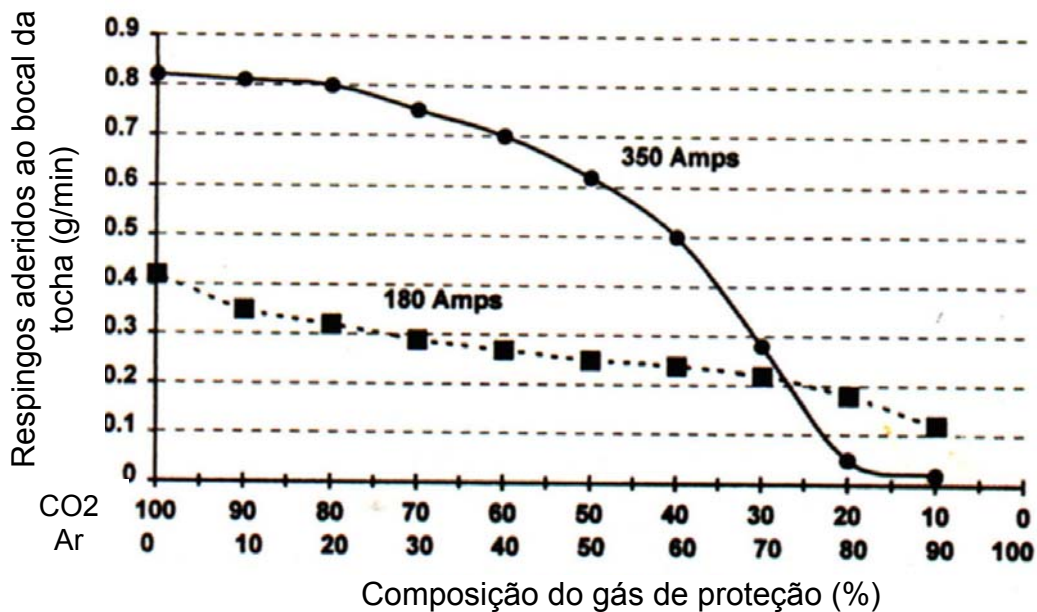


Figura 2.11 - Redução do nível de respingos com a redução do teor de CO₂ no gás de proteção. [60]

Em se tratando de respingos, existe também o efeito explosivo causado por gases ricos em CO₂, advindo da formação de gases de oxidação e sua expansão repentina. Este fato contribui para a afirmação de que gases ricos em CO₂ produzem, em geral, pior acabamento da solda e necessidade de limpeza adicional da mesma e, devido à adesão de respingos ao bocal, maior tempo de limpeza deste e maior possibilidade de contaminação da poça, por perturbação no fluxo de gás [4,20,37,56,63].

Outro efeito importante do CO₂, no caso do CCC (imposição de corrente), é o aumento da potência gerada no processo, em comparação com gases mais pobres em CO₂, reiterando-se que em regulagem semelhante de corrente. Uma mesma corrente impõe tensões maiores para misturas com mais CO₂. Isto se traduz em maior fluidez na poça, e conseqüente maior molhabilidade [4,35,62]. Esta informação é importante quando da determinação da forma de onda do CCC para diversas misturas. A literatura [61] cita, também, que maior quantidade de CO₂ gera mais oxidação do Silício contido nos materiais e esta reação gera calor, contribuindo para o aumento da temperatura e fluidez do metal fundido.

É sabido que a transferência metálica por curto-circuito, geralmente obtida com misturas ricas em CO_2 , fornece soldas com menos hidrogênio difusível, que tende a gerar trincas (Tabela 2.2). Vaidya [26] sugere como explicação para isso uma menor relação área superficial/volume obtida nas maiores gotas deste modo. Por outro lado, redução no nível de CO_2 tende a resultar em menos oxigênio no metal de solda, aumentando a tenacidade, devido à redução no nível e tamanho de inclusões óxidas [4].

Tabela 2.2 - Quantidade de hidrogênio difusível no metal de solda, de acordo com o gás de proteção e seu potencial de oxidação.[26]

Gás de Proteção	Potencial de Oxidação	Hidrogênio difusível (ml/100 g)
Ar + 5 % CO_2	2,5	1,51
Ar + 15 % CO_2	7,5	Não disponível
Ar + 20 % CO_2	10	1,29
100 % CO_2	50	0,85

A literatura também cita como função do gás de proteção a determinação do perfil e profundidade de penetração. Vaidya [26] afirma que isto advém de uma tendência das misturas com alta porcentagem de Ar em relação ao CO_2 , de causar transferência por escoamento goticular axial, o que causaria maior eficiência de fusão no centro do cordão de solda e o chamado *finger shape* (penetração em forma de dedo, Figura 2.12), enquanto crescentes porcentagens de CO_2 levariam a uma transferência por curto-circuito, modificando o perfil transversal do metal de solda.

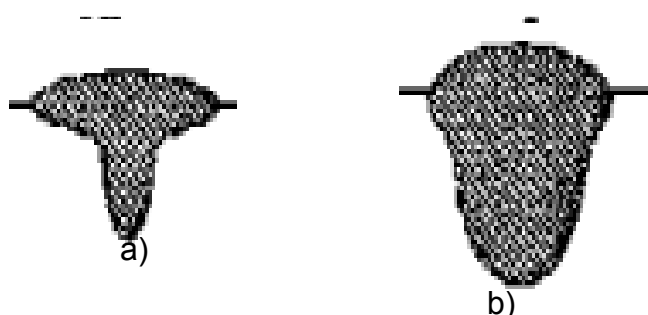


Figura 2.12 - Perfis de penetração típicos (e didáticos) de misturas de Ar e CO_2 a) baixa porcentagem de CO_2 e b) alta porcentagem de CO_2

Outros autores afirmam que esta tendência ao *finger shape* para misturas mais ricas em Ar advém da maior concentração de calor na região central do arco, ou ainda, pela possível maior força de arraste sobre as gotas [20,68]. O fato é que existe, ainda, controvérsia em relação aos mecanismos de penetração atuantes no processo MIG/MAG, as quais serão abordadas a seguir. Realmente existe uma tendência ao *finger shape* para misturas mais ricas em Ar, como verificado em experiências no LABSOLDA, mas não se pode afirmar que sua determinação seja função do gás de proteção. Primeiramente, porque é um perfil indesejável para a solda, ou seja, não se escolheria uma mistura gasosa para determinada solda com a função de causar *finger shape*. E em segundo lugar, porque a determinação do modo de transferência (considerando que este determina o perfil transversal da solda), como já mencionado, depende, principalmente, da corrente, tendo o gás apenas influência no resultado.

Em relação à taxa de fusão, a composição do gás não exerce influência direta. Embora, ao se avaliarem diferentes misturas, se tenha certa liberdade para alterar a velocidade de alimentação de arame, esse fato é devido aos efeitos que o gás pode ter sobre o processo, e não diretamente por sua composição [38,65,66].

Existe a questão do potencial de oxidação, cujo cálculo para determinação é sugerido por alguns autores, em diferentes versões [4,26]. O conceito de potencial de oxidação não está, ainda, estritamente definido, em geral é tido como o modo pelo qual a quantidade de oxigênio no metal de solda resultante é afetada pelo gás de proteção. A redução no nível de CO₂ do gás de proteção reduz seu o potencial de oxidação, resultando, de uma maneira geral, em soldas com mais tenacidade (Figura 2.13), menos escória, e menores perdas de elementos de liga por oxidação (Figura 2.14 e Tabela 2.3) [4,26]. Menor nível de emissão de fumos também é uma consequência (Figura 2.16), reduzindo a insalubridade do ambiente para o soldador [26].

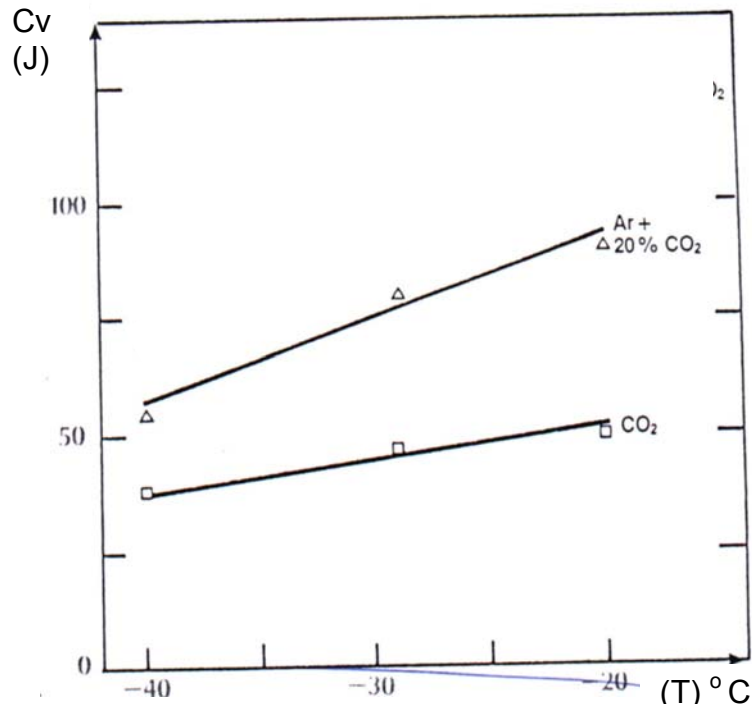


Figura 2.13 - Tenacidade de soldas com dois diferentes gases de proteção, mesmo arame e condições de soldagem similares. [4]

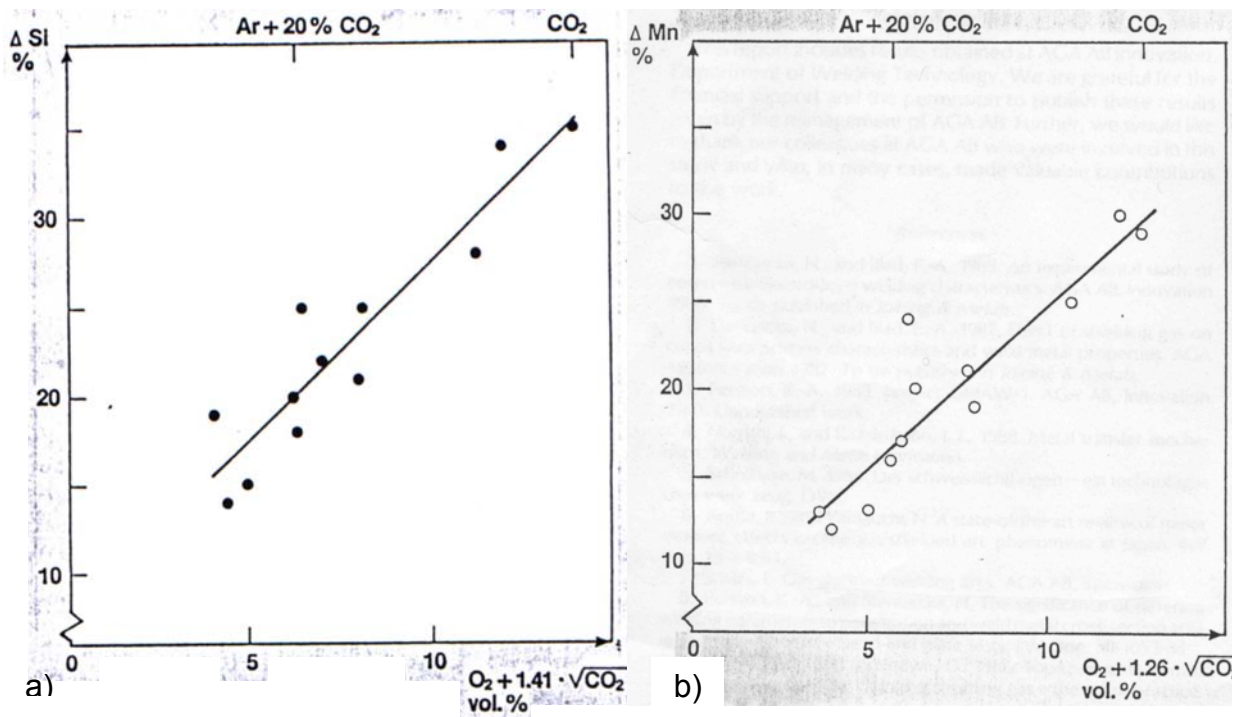


Figura 2.14 - Perda de a) Silício e b) Manganês por oxidação, como porcentagem do teor original do elemento no arame (a) 0,85%; b) 1,42%), de acordo com o potencial de oxidação do gás (segundo esta fonte, dado por $\{ \% O_2 + 1,41 \cdot (\% CO_2)^{1/2} \}$ para o Si e $\{ \% O_2 + 1,26 \cdot (\% CO_2)^{1/2} \}$ para o Mn). [4]

Tabela 2.3 - Perda de elementos de liga (Si e Mn) por oxidação, em relação à composição original do arame. [26]

Gás de Proteção	Perda de elementos de liga por oxidação (%)	
Arame	1,25 % Mn	0,73 % Si
Ar + 10 % CO ₂	0,98 % Mn	0,57 % Si
Ar + 18 % CO ₂	0,93 % Mn	0,5 % Si
Ar + 35 % CO ₂	0,89 % Mn	0,42 % Si

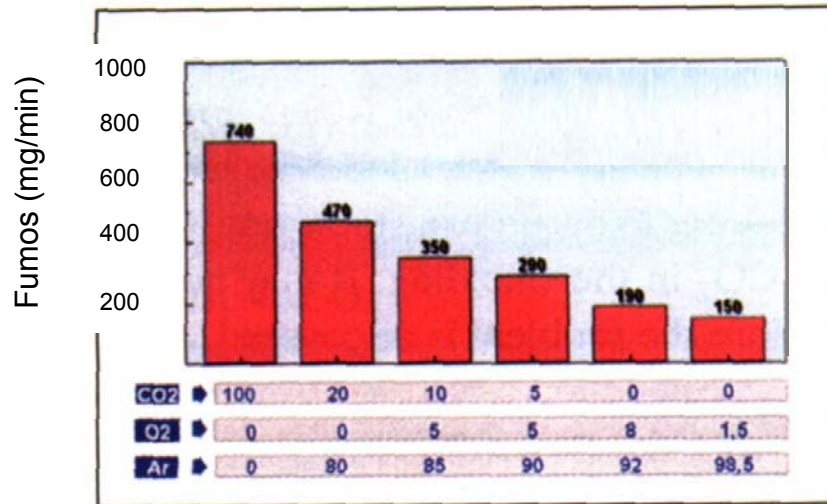


Figura 2.15 - Efeito da composição do gás de proteção sobre a taxa de geração de fumos, para situações similares de soldagem. Eixo x em %.[26]

2.3.3 - Fatores Econômicos

Dado o crescimento do setor de Petróleo e Gás e o altíssimo volume de recursos gerados e dispendidos, a competitividade das empresas do ramo se torna crucial para sua sobrevivência. Sendo assim, o enxugamento das operações e conseqüente redução de custos devem fazer parte da estratégia de ação dessas empresas, ressaltando-se que de maneira racional, observando todos os aspectos relevantes. Incluem-se, aí, as operações de soldagem na construção *offshore* das linhas dutoviárias petrolíferas, as quais exigem considerável quantidade de investimento.

De uma maneira geral, soldas realizadas com misturas ricas em Ar, com pouco CO₂, têm maior chance de apresentar resultados satisfatórios quando há um caráter mais crítico em termos de requisitos de regularidade na transferência metálica e geração de respingos, como passe de raiz, chapas finas e peças onde a estética é um critério de avaliação, seja pela possibilidade de se utilizar corrente

pulsada, seja pelo caráter errático e explosivo da transferência metálica característico do CO₂. Por outro lado, o CO₂ é, tradicionalmente, visto como o gás de menor custo, e, assim, pode surgir uma barreira à adoção de misturas com Ar. Esta comparação de custos deve ser muito criteriosa, pois os ganhos em produtividade obtidos com misturas tendem a sobrepujar o fato de estas serem mais caras (se isso realmente ocorrer). Ou seja, o próprio preço dos gases deve ser realmente analisado, pois se sabe que varia de acordo com a disponibilidade, logística necessária, região, etc...[2,35,60,64].

O fato mais relevante, porém, é que o gás de proteção representa uma fatia pequena dos custos da soldagem MIG/MAG, como mostra a Figura 2.16. Este cenário é confirmado por várias fontes [35,60,61], mostrando que investimentos em misturas mais eficientes (mesmo que mais caras), que resultarem em aumento da produtividade da mão de obra, têm impacto significativo no custo geral da produção.

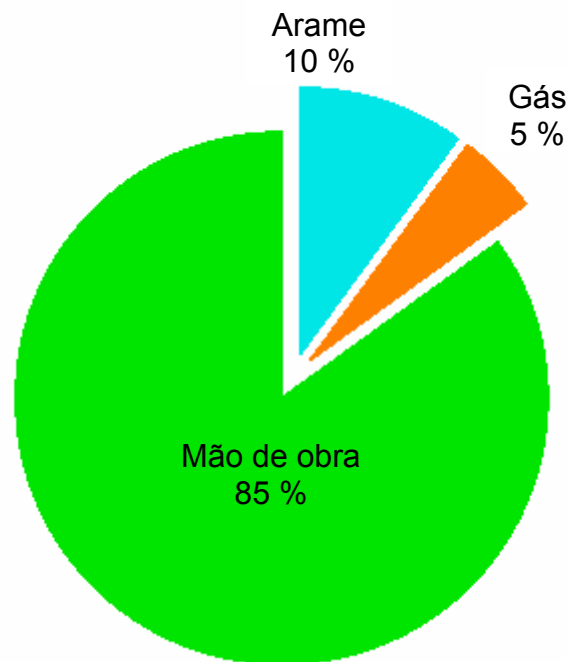


Figura 2.16 - Custo geral típico da solda no processo produtivo, para aço comum.
[35,60,61].

2.4 - Mecanismos de Penetração e Aporte Térmico

A importância do entendimento dos mecanismos de penetração na soldagem MIG/MAG se dá tendo em vista que o seu controle constitui uma função atribuída à forma de onda de sistemas similares ao aqui desenvolvido. O controle do aporte térmico também é função da forma de onda e, ao determinar importantes

características da solda, como metalúrgicas e geométricas, também merece ter seus aspectos investigados.

2.4.1 - Penetração

Apesar do considerável volume de material pesquisado, muito pouca informação está disponível sobre os mecanismos de penetração na soldagem MIG/MAG em transferência metálica por curto-circuito. A maioria dos autores aborda a transferência em vôo livre. Já as fontes de informação sobre os sistemas MIG/MAG TMCCC apresentam informações vagas e contraditórias em relação à atuação dos mecanismos de penetração presentes, o que será comentado adiante, no item dedicado a estes sistemas. No entanto, todos foram considerados, a fim de, em conjunto com os resultados dos ensaios, se levantarem hipóteses mais fundamentadas sobre a penetração no CCC.

No caso da transferência em escoamento goticular axial (*spray*), as teorias mais citadas consideram a variável corrente de soldagem como a mais importante para determinação da penetração [21]. A questão é: a corrente influencia diretamente essa característica da solda? Pesquisas que investigavam esta questão, nas quais apenas a corrente foi a variável alterada, verificaram que, por si só, grandes variações neste valor não acarretam variações significativas na penetração [18,21,58]. É importante ressaltar que nestes testes não havia transferência metálica, apenas fusão do metal de base. Há, na literatura, trabalhos que afirmam o contrário, creditando maiores penetrações à maior intensidade da força de arraste do plasma [25] ou à modificação do perfil de convecção e aparecimento de um vortex na poça [20,58,69], decorrendo, sim, do aumento da corrente. Os resultados do presente trabalho tendem a considerar a teoria do vortex como válida para a transferência metálica por curto-circuito.

A primeira linha de pensamento citada deduz que a penetração obtida é decorrente da frequência de impacto das gotas sobre a poça. Ao se reduzir o espaço de tempo entre o impacto de uma gota e da seguinte, há menos tempo para a cavidade causada na poça pela primeira gota se recuperar, até o impacto da gota posterior. Com isto, há maior eficiência na transferência do calor contido na gota, superaquecida, para o metal de base, aumentando a penetração [17]. Segundo esta teoria, a energia cinética desenvolvida pela gota metálica ao longo do arco não é relevante perante as outras formas de energia envolvidas [18,21], o que é contestado em outros trabalhos. Na transferência por curto-circuito este fator não se

inclui, pois a gota não é impelida em vôo livre até impactar contra a peça e, portanto, não será mais profundamente analisado.

Na transferência por curto-circuito convencional, se relaciona a penetração com a distância bico-de-contato/peça (DBP). Esta questão será mais bem analisada adiante, no item 2.5.

2.4.2 - Aporte térmico

Tradicionalmente, o aporte térmico AT (*heat input*) é descrito como a quantidade de calor imposta à peça em uma operação de soldagem e calculado pela equação

$$AT = I_m \times U_m / V_s \quad (8),$$

onde se considera I_m como a corrente média e U_m a tensão média da solda, e V_s a velocidade de soldagem. Esse método acometido de erro, no entanto, tanto quanto ao seu próprio cálculo, pois a potência média desenvolvida pelo arco numa solda é dada, corretamente, considerando-se valores instantâneos de corrente e tensão [89,96], assim como quanto à real contribuição desta potência para a energia absorvida pela peça [38], além de que, em sua própria definição, esta expressão representa a potência nominal fornecida, sem considerar o rendimento do processo [70]. Existe até a afirmação de que o aporte térmico é calculado pela área abaixo da curva de corrente por tempo [72], o que ajuda a evidenciar o fato de que este é um conceito que deve ser mais bem definido e padronizado. Na visão do autor, cálculos mais efetivos do aporte térmico são dados quando a energia absorvida pela peça é medida diretamente, como, por exemplo, através de calorímetros.

Utilizando este último método (medição por calorímetros), Essers [18] concluiu que o rendimento η do processo MIG dado por

$$\eta = \text{Aporte térmico à peça medido no calorímetro} / \text{potência total do arco} \quad (9)$$

é 71 %, e que grande parte do calor aportado à peça provém da gota, concordando com outros autores [17,21]. De fato, cerca de 99 % da energia necessária para a fusão do metal de solda está contido na gota metálica, que está superaquecida [21,18]. Isso vai ao encontro de resultados obtidos com polaridade direta, isto é, arame-eletrodo como pólo negativo, no qual as gotas apresentam menor nível de superaquecimento (e estão cerca de 101 K mais frias que na polaridade inversa),

obtendo menos fusão do material de base [23]. Os valores mais citados para a temperatura da gota são consideravelmente mais altos que a temperatura de fusão do aço, e ficam em torno de 2130° C, com pequenas variações de acordo com a corrente de soldagem [18,21] a 2400° C [17]. Halmoy [66] sugere uma temperatura próxima a de fusão para a gota. Considera-se a primeira faixa citada como verdadeira. Lesnewich [26] afirma, ainda, que o nível de superaquecimento da gota se reduz com a redução da corrente de soldagem (e conseqüente aumento de seu diâmetro), reduzindo a fluidez da poça metálica.

Ainda no contexto do rendimento, num dos trabalhos acima citados, no processo Plasma/MIG, cerca de 26 % da potência gerada durante a solda é necessária para fundir o metal de solda e o restante é dissipado para o ambiente e para a peça [21]. Além disso, o principal mecanismo de transferência de calor da coluna do arco para a peça é citado como sendo convecção, e não radiação [38]. E esta porção é responsável pela largura do cordão, sua molhabilidade e características metalúrgicas da solda [18,21,38,71].

O item 2.6 detalhará a questão do aporte térmico nos sistemas de controle de corrente na soldagem MIG/MAG em transferência metálica por curto circuito (MIG/MAG TMCCC).

2.5 - O processo MIG/MAG Convencional

A transferência metálica por curto-circuito, no processo de soldagem MIG/MAG, é caracterizada, como a própria designação sugere, pelo contato entre a gota metálica líquida, ainda ligada ao arame eletrodo, e a poça de fusão. Sob ação das forças acima descritas, esta gota, inicialmente (e idealmente) esférica, começa a se restringir, assumindo a forma cilíndrica, formando a chamada ponte metálica, qualificada como estável quando chega ao mesmo diâmetro do arame-eletrodo em todo o seu comprimento. A constrição continua e assume uma velocidade crescente, com taxa também crescente até que, enfim, a ponte colapsa, caracterizando a transferência da gota formada no período de arco anterior, porém com a retenção de certa quantidade de metal líquido ainda na ponta do arame-eletrodo. O arco está novamente aberto.

O curso acima descrito é bem conhecido e é descrito, também oscilograficamente no esquema da Figura 2.17.

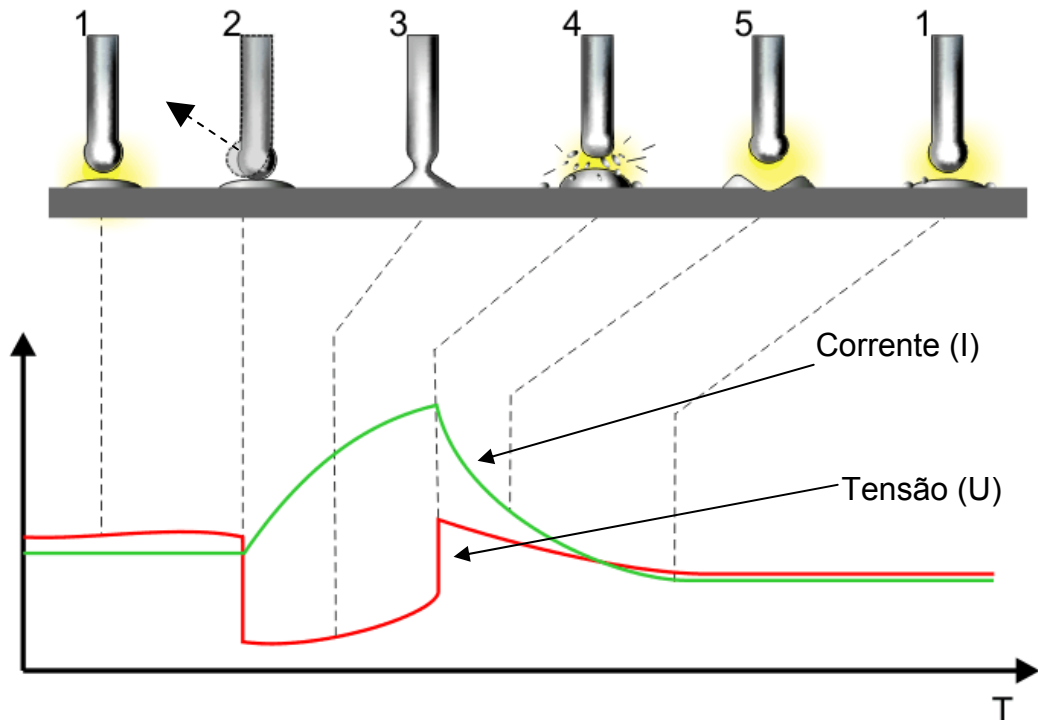


Figura 2.17 - Curso da transferência metálica por curto circuito no processo MIG/MAG convencional.

Neste caso, são utilizadas fontes de energia de característica estática do tipo tensão constante (esquema na Figura 2.18) e, em assim sendo, a variável regulada é a tensão de soldagem (U_{ref}), assim como a velocidade de arame (V_a). A intensidade da corrente de soldagem será, então, uma consequência da conjunção destas duas.

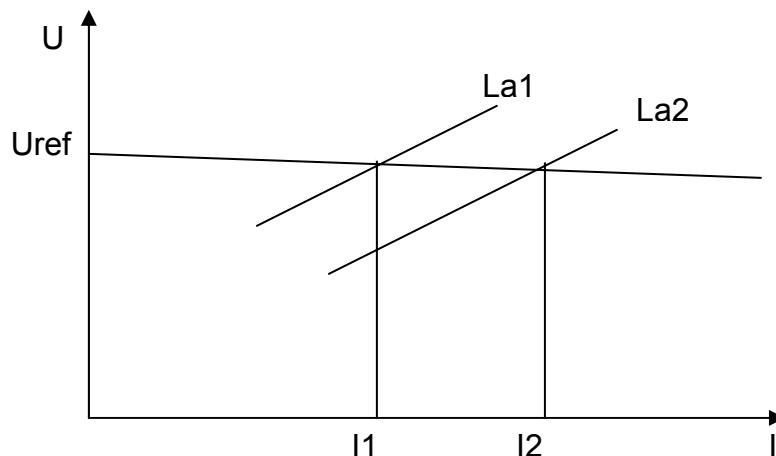


Figura 2.18 - Curva característica estática para uma fonte de tensão constante. La é o comprimento de arco. $La2 < La1$. Para uma mesma DBP, La depende da V_a .

Abordando o aspecto oscilográfico da Figura 2.17, observa-se-se que, ao ocorrer o curto-circuito, a corrente entra numa rampa de subida, um transitório, pois a fonte de

energia tenta impor uma tensão entre seus terminais de saída, ou seja, entre a peça e o arame-eletrodo. A inclinação da rampa é função da tensão regulada e da indutância.

Durante o curto-circuito, como a corrente cresce e a área do condutor diminui, pela constrição da ponte metálica, o Efeito Pinch e a componente axial da força de Lorentz, crescem em taxa também crescente, pois são proporcionais ao quadrado da corrente e à sua densidade. Assim que a ponte se desfaz, o arco é novamente estabelecido. Neste momento, a corrente está num patamar alto, e a tensão ultrapassa seu valor regulado. A máquina impõe a tensão regulada, causando também redução na corrente. Quando a tensão do arco alcança aquela regulada, a corrente de arco se estabiliza. A corrente, durante o arco, causa a formação de uma nova gota metálica e mantém o aquecimento da poça fundida.

Os itens a seguir tratam mais profundamente os aspectos da transferência metálica por curto-circuito cujo domínio foi considerado fundamental para o desenvolvimento do CCC.

2.5.2 - Aspectos relevantes do Mecanismo de Transferência Metálica

A estratégia escolhida para realizar o controle da energia no período de curto-circuito do CCC e, conseqüentemente, otimizar a transferência metálica, se baseia na dinâmica da ponte metálica, que pode ser traduzida pelo comportamento da resistência do circuito de soldagem, considerado entre o bico de contato e a peça. Para um melhor entendimento, a dinâmica da transferência metálica foi estudada desde o contato entre a gota e poça, passando pela formação da ponte metálica, até o completo destacamento.

Ao entrar em contato com a poça fundida, a gota metálica, submetida, agora, à tensão superficial daquela, passa a ser puxada em direção à poça. A área de contato inicial é menor que a área transversal do arame-eletrodo. Devido a esse fato, este momento é crítico, pois como descrito no item sobre forças, existirá uma tendência à expulsão da gota pelas forças eletromagnéticas, caso haja um aumento brusco da corrente de soldagem. A gota, na prática não é esférica nem tampouco simétrica, e está sujeita a vibrações [74]. Além disso, e, principalmente, quando se utiliza uma mistura que contém gás oxidante como gás de proteção, há, devido ao aquecimento localizado, uma tendência à formação de óxidos gasosos que se expandem, causando uma característica repulsiva na transferência (Figura 2.19) [20]. Este é o mecanismo de formação de respingos no início do curto-circuito.

Naturalmente, quando se têm parâmetros e variáveis de soldagem regulados adequadamente, isso pode ser mantido num nível aceitável.

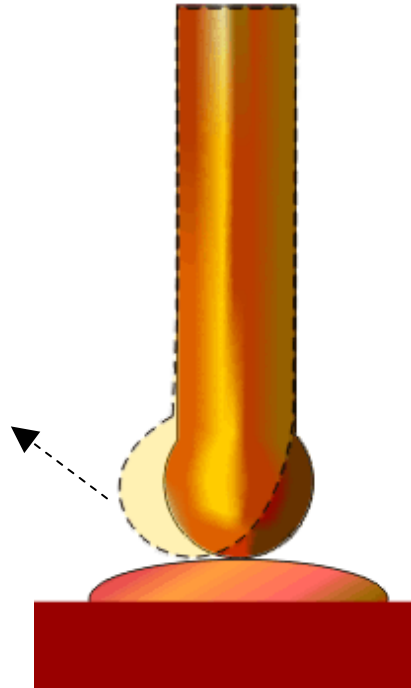


Figura 2.19 - Tendência à geração de respingos por expulsão da gota metálica no momento inicial do curto-circuito entre a esta e a poça fundida.

Após a estabilização do contato, a área do mesmo cresce, ao passo que a tensão superficial da poça atrai a gota metálica para si. O diâmetro da gota (ponte metálica) se reduz continuamente, até atingir o mesmo diâmetro do arame-eletrodo, tendo atingido, então, a estabilidade da ponte metálica (conceito estipulado para esse estado). A velocidade de expansão do diâmetro de contato é maior que a velocidade de redução do diâmetro da gota, até ser alcançada a estabilidade. Depois disso, a área de contato continua crescendo, porém o diâmetro da ponte permanece estável e constante por um certo período, apesar de possíveis variações na corrente. Este fato foi visualizado por alguns autores e confirmado por outros, que analisaram o comportamento resistivo do circuito de soldagem durante o curto-circuito, detectando um período onde a resistência se mantém constante, como mostram as Figuras 2.20 e 2.21 [47,48,79]. Para este período, é citado o tempo de 2 ms.

A Figura 2.21 foi extraída de um trabalho destinado à medição da DBP, comparando os níveis de resistência no patamar estável. Como se pode ver, também na mesma figura, a resistência reflete o comportamento citado na introdução deste capítulo. Primeiramente, ao ocorrer o contato, a resistência é alta

devido à pequena área de condução, seguindo-se uma queda abrupta em seu valor, devido à rápida expansão desta área. Alcança-se a estabilidade da ponte metálica e ocorre um patamar de resistência, seguido de um aumento, em taxa crescente, desse valor, devido ao empescoçamento da gota (redução da área transversal da ponte metálica). Resultados de ensaios do presente trabalho confirmam esse comportamento, como será visto adiante.

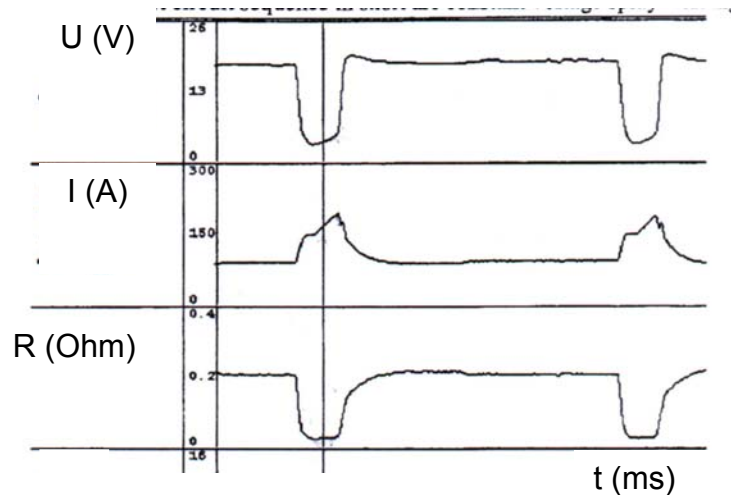


Figura 2.20 - Comportamento da resistência no período de curto-circuito, mantendo-se num praticamente constante por cerca de 2 ms.[47]

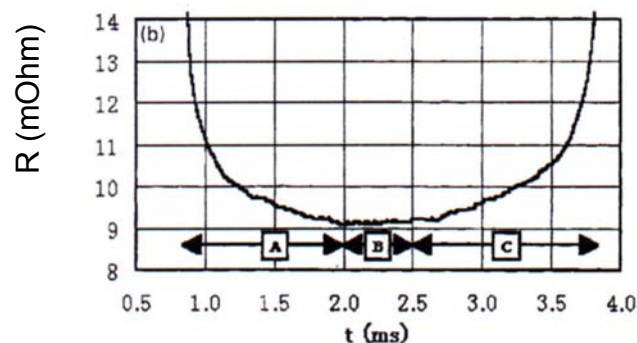


Figura 2.21 - Comportamento da resistência no período de curto-circuito, mantendo-se praticamente constante por cerca de 2 ms.[79]

Outro aspecto importante neste assunto são os tempos envolvidos no curso da transferência. O conhecimento destes tempos e dos fatores que os determinam são necessários para que o sistema pretendido (CCC) atue de maneira eficaz.

Sabe-se que o tempo total de destacamento, ou seja, o tempo desde o fechamento do curto-circuito até a reignição do arco, é dependente da corrente de soldagem, numa razão inversa, e do volume da gota, numa razão direta. Esses dois fatores são citados como sendo os mais importantes na dinâmica da transferência [59,81]. Isto é demonstrado tanto em simulações numéricas computadorizadas,

como em ensaios de solda (Figuras 2.22 e 2.23, respectivamente). É válido lembrar que, quando de simulações, algumas hipóteses são feitas, como a simetria e esfericidade da gota e a circularidade do contato entre gota e poça.

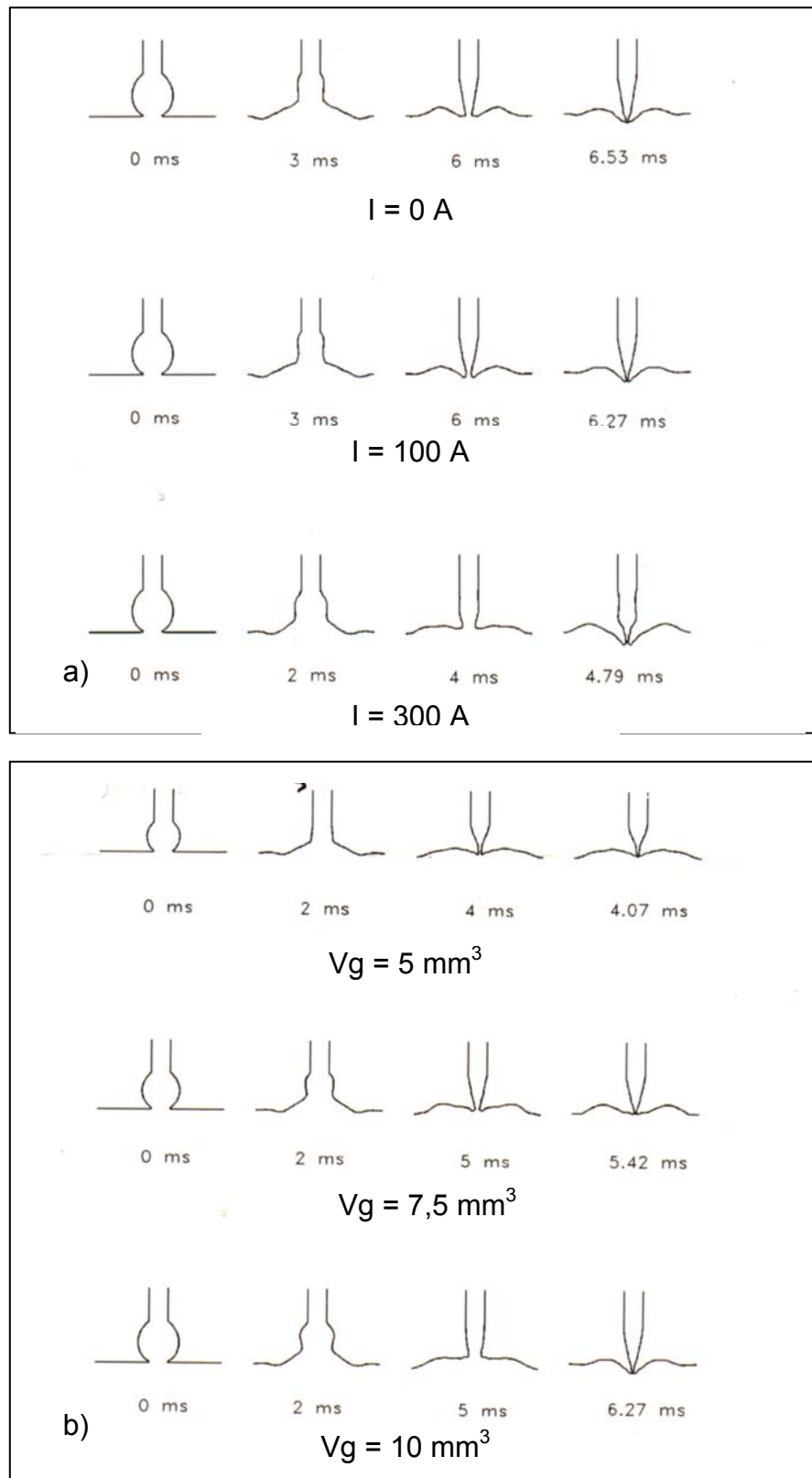


Figura 2.22 - Simulação da transferência metálica por curto-circuito, evidenciando maior tempo de destacamento para a) menores correntes e b) maiores volumes.[59]

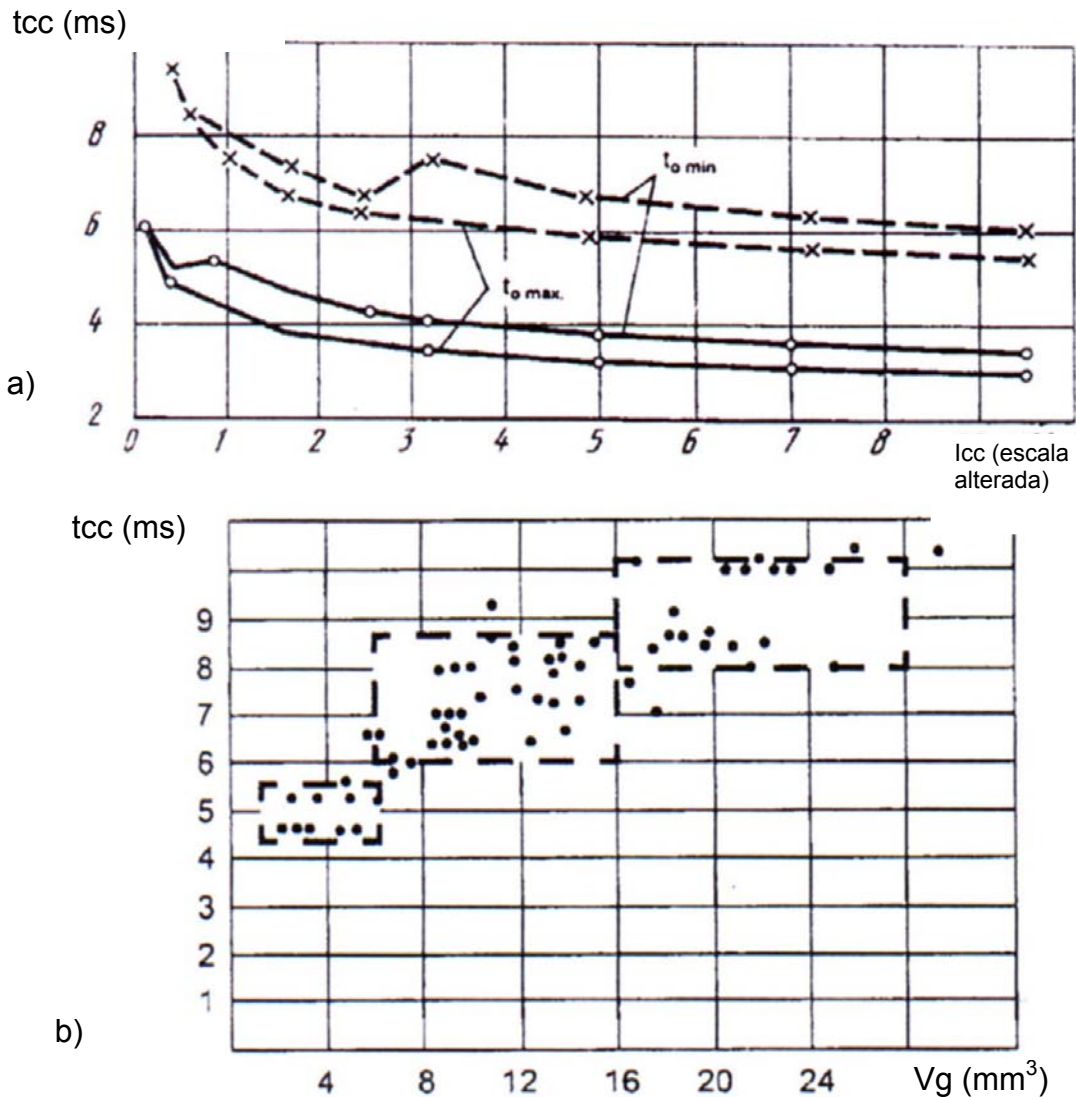


Figura 2.23 - Transferência metálica por curto-circuito, evidenciando maior tempo de destacamento para soldas em a) menores correntes (escala ilustrativa de corrente) [45] e b) maiores volumes.[52]

Em seus ensaios, Ishchenko e Lebedev [52] estratificam o tempo de destacamento em três componentes: tempo de formação da ponte, tempo de pulso de corrente e tempo para fratura da ponte. O primeiro compreende o intervalo entre o contato e a estabilidade da ponte, o segundo determina um pulso de corrente para forçar o empescoçametno da gota e o terceiro ocorre em corrente baixa e dura do fim do anterior até a fratura da ponte. Uma das informações de interesse é que há aumento do tempo de estabilização da ponte com aumento da corrente durante este estágio. Por outro lado, como já mencionado, há redução no tempo de empescoçamento após a formação da ponte, com o aumento da corrente, o que decorre do Efeito Pinch. Resultados de Choi [59,81] concordam com essa última

afirmação, porém concluem que, na fase inicial da transferência, ou seja, até a formação da ponte metálica estável, a corrente não influi na dinâmica da ponte metálica, e a força predominante é devida a tensão superficial. Considerando os trabalhos aqui citados, não é possível determinar categoricamente o comportamento dinâmico da ponte metálica desde o contato da gota com a poça até a estabilização da ponte. Para isso, seriam necessários novos ensaios de solda, filmados em alta velocidade (quadros/s), em sincronia com a aquisição de dados elétricos. Pode-se assumir, porém, que, para o universo de diâmetros de gota utilizado na realidade deste trabalho, não há variação no tempo de formação da ponte metálica e, além disso, que esta ocorre em redor de 1 ms. Aliado ao fato citado acima, de que a ponte permanece estável entre 1 e 2 ms, e a resultados do próprio CCC, isto dá suporte para determinação de importantes parâmetros do mesmo. Outra conclusão de Choi é que a velocidade de alimentação de arame não influi na dinâmica da transferência metálica, o que já era esperado, devido à grande velocidade de destacamento da gota, como um todo, em relação à velocidade de arame. Os trabalhos citados não foram realizados com o processo MIG/MAG convencional, porém seus resultados puderam ser considerados na descrição da dinâmica da transferência metálica, pois abordaram o modo de transferência por curto-circuito.

Resultados anteriores obtidos no LABSOLDA tendem a concordar com o exposto. A Tabela 2.4 mostra que, em se mantendo a mesma tensão e velocidade de arame reguladas e aumentado-se a indutância, o efeito da terceira aparece, ou seja, a rampa de corrente após o curto-circuito é mais lenta, e o curto se estende por mais tempo. [88].

Tabela 2.4 - Tempos de curto-circuito para diferentes indutâncias, as quais são inversamente proporcionais aos coeficientes K_s e K_d . Estes traduzem, diretamente, a velocidade de atuação da máquina. $V_a=5$ m/min, $U_{ref}=21$ V. [88]

Efeitos indutivos K_s e K_d	Corrente Média (Im)	Tempo de curto-circuito (tcc)
10	128 A	3,9 ms
20	124 A	3,2 ms

Neste sentido, consideram-se as conclusões de Ishchenko e Lebedev mais adequadas, pelo fato de terem filmado a transferência real. Ou seja, como o volume da gota nos dois casos da Tabela 2.4 é o mesmo em termos médios, supõe-se que, quando o curto acontece em correntes mais baixas e, também, alcançam valores maiores mais rapidamente, os tempos de formação da ponte e de sua estricção até a ruptura caem, resultando na redução do tempo total de curto-circuito. Nota-se que a corrente média permanece a mesma, em termos práticos.

Os resultados de Eassa [72], que dispunha de um sistema que mantinha a corrente de arco constante até o curto-circuito, tendem a confirmar essa suposição, no que tange ao tempo de destacamento (tcc) para um mesmo volume de gota. Ao alterar apenas a inclinação da rampa de subida de corrente, ele observou que a corrente no momento do destacamento era a mesma. Ou seja, para maiores inclinações, o tempo de formação da ponte é maior, mas isso é sobrepujado pelo fato de o Efeito Pinch, proporcional ao quadrado da corrente, ser bem mais acentuado após o início da estricção, pois a corrente chega a patamares mais altos mais rapidamente. Assim, o tempo de destacamento é menor. Eassa, no entanto, atribui este fato à necessidade de uma mesma quantidade de energia para expulsar a gota, expressa pela área abaixo da curva de corrente x tempo. Essas informações ajudarão na determinação fundamentada de parâmetros e variáveis do CCC.

Assim como no início do curto-circuito, também há tendência à formação de respingos no instante de ruptura da ponte metálica, sendo que o mecanismo atuante agora é diferente em alguns aspectos. Há uma redução na área do condutor, devido ao estriccionamento da ponte metálica líquida e a densidade de corrente aumenta, acompanhada das forças eletromagnéticas. Como a geometria da ponte, na prática, não é simétrica, essas forças podem se desbalancear a um certo ponto em que expulsam material quando há a ruptura. Em correntes mais altas, adicionando-se o aumento da resistência elétrica pela redução da área transversal da ponte metálica líquida, também a temperatura da ponte é maior devido ao efeito Joule, levando à vaporização e conseqüente expansão do material, num comportamento explosivo [59]. Embora o mecanismo de formação de respingos seja similar, no início do curto o efeito das forças eletromagnéticas é o fator proeminente na formação de respingos e estes tendem a ser maiores, pois há tendência de expulsão da gota inteira (Figura 2.19).

2.5.3 - Distância Bico de Contato – Peça (DBP)

Questões relativas à DBP devem ser colocadas, uma vez que esse parâmetro de soldagem está intimamente relacionado ao fundamento e à razão de existir de sistemas de soldagem MIG/MAG TMCCC. Variações neste valor acarretam alterações indesejáveis no processo e na solda, em se tratando do método convencional, em controle de tensão, principalmente na soldagem semi-automática. Em certos casos, este fato é plenamente aceitável. Em alguns sistemas de Seguimento de Junta não só é aceitável, como a variação de corrente, advinda da variação da DBP, é necessária. Porém, para aplicações cujos resultados são submetidos a uma avaliação mais rigorosa, se estimulou o desenvolvimento de sistemas que monitorassem essas variações na DBP e as realimentassem aos mesmos, aumentando a homogeneidade do resultado como um todo.

Como citado no item 2.1.2, o aumento de L (*stick out*) ocasiona aumento da contribuição do efeito Joule para a fusão do arame-eletrodo. Ao mesmo tempo, há variação na corrente média de soldagem e conseqüente variação na temperatura e fluidez do metal de solda [49,73]. Ademais, variações em L, conseqüentes de variações na DBP, normalmente impostas pelo soldador na soldagem semi-automática, significam variações pontuais na freqüência de transferência e na deposição de material, pois, na realidade, o que há é uma composição de velocidades, somando-se à velocidade de alimentação regulada na máquina a velocidade de mergulho ou afastamento da tocha pelo soldador [4].

Outras questões sobre esse efeito também devem ser mais bem analisadas. Algumas fontes de informação, por exemplo, relacionam diretamente uma redução da penetração com aumento da DBP e L [75,25]. Na realidade, o que acontece é uma redução de corrente média de soldagem, tendo os efeitos citados no item 2.4.1 e mostrados no item 5.1. Quanto ao fato, regularmente citado na literatura, do aumento na velocidade de arame decorrente de aumento de DBP, surge também um ponto. Para uma regulagem fixa de parâmetros e variáveis, DBP pode ser alterada, com possíveis conseqüências no resultado obtido, sem que haja alteração na V_a , embora, provavelmente, existam limites para esta variação. Ensaios a serem apresentados neste trabalho, assim como os realizados em [87], e [25] são exemplos.

2.5.4 - Estabilidade

Muito se menciona, tanto no dia-a dia da soldagem, como também na literatura científica e tecnológica, o termo “estabilidade” para caracterizar o bom andamento de uma solda. Pergunta-se: o que realmente é estabilidade ? Como quantificá-la ? A soldagem MIG/MAG convencional em transferência metálica por curto-circuito pode ser considerada inerentemente instável, devido à sucessão de curtos-circuitos e períodos de arco. Inclusive, há quem afirme que, para uma solda estável, a transferência metálica deve ser por escoamento goticular axial, ou seja, sem curto-circuito [27,28]. Porém, isso, obviamente, não inviabiliza sua aplicação e essa afirmação parece tendenciosa, de acordo com o que é proposto nestas fontes. Há algum tempo, a estabilidade era tratada apenas qualitativamente, devido, principalmente, à falta de recursos tecnológicos para quantificá-la. Era determinada pelo soldador pelo tipo de ruído que se gerava, ou pela quantidade de respingos, de acordo com sua experiência, habilidade e, por que não citar, vontade [26,39,74,76]. Fala-se também, em estabilidade da poça. Esta, ainda, é tratada em termos qualitativos, na maioria dos casos. Nesse sentido, ela significa o não escorrimento do metal, quando em soldas fora de posição e a homogeneidade na geometria da poça líquida e solidificada ao longo da solda [26]. Assim será tratada neste trabalho, embora existam pesquisas que investigam a característica dinâmica da poça, sua oscilação mecânica durante o processo, etc...[36]

Intrinsecamente, o comportamento do arco na soldagem MIG/MAG por curto-circuito é errático [59], fato que se agrava com o aumento da porcentagem de CO₂ no gás de proteção. Apesar disso, e com o auxílio de modernas técnicas de software e hardware, o comportamento macro do arco, estreitamente dependente das características da fonte de energia, é passível de ser monitorado e manipulado, factibilizando sua aplicação como ferramenta para soldagem. Sua estabilidade é conceituada, distintamente, por diversos autores, como sendo: o grau de imutabilidade geométrica do arco durante a solda, manutenção do balanceamento entre velocidade de arame e taxa de fusão, a já citada transferência em escoamento goticular axial (*spray*), a qualidade das condições do arco e sua adaptabilidade a operações de soldagem, maior freqüência de transferência ou a sincronia entre a última e a freqüência de oscilação da poça [26,27,28,36,72]. Esses conceitos se completam, ou então consistem, na realidade, em requerimentos fundamentais do processo MIG/MAG, ou não traduzem a possibilidade de sucesso de uma solda, que é, na opinião do autor, o que uma solda estável deve ser. Ou seja, a estabilidade de

um procedimento de soldagem, na visão do autor, se dá quando o resultado do mesmo é uma solda com regularidade na transferência metálica, independente do tipo, e homogeneidade da mesma ao longo do cordão, produzindo um mínimo de respingos, os quais não comprometam o conforto do soldador e nem acarretem em tempos secundários excessivos de retrabalho, produzindo uma poça e metal de solda também geometricamente homogêneos em toda a extensão do cordão.

O comportamento estático do arco (tensão x corrente) na soldagem MIG/MAG com transferência por curto-circuito pode ser obtido com sistemas de aquisição de dados como o utilizado neste trabalho, tendo o poder de fornecer informações palpáveis quanto à estabilidade de um procedimento de soldagem [63]. Dados obtidos neste trabalho, que confirmam a validade deste método de avaliação da estabilidade, serão apresentados adiante. Uma ferramenta utilizada para a quantificação da estabilidade do processo na soldagem MIG/MAG convencional, em transferência metálica por curto-circuito consiste no histograma dos valores dos picos de corrente, e o respectivo desvio padrão [76,77,78]. Trata-se de uma ferramenta potente, uma vez que, indiretamente, traduz a variabilidade do tamanho de gota, da corrente média e dos tempos de arco e curto-circuito, e se materializa em sistemas que englobam instrumentação e softwares de aquisição e tratamento de dados, dedicados a processos de soldagem. Sistemas assim, desenvolvidos no próprio LABSOLDA, foram utilizados neste trabalho, nos ensaios em MIG/MAG convencional. Para o CCC, como a corrente é controlada, esta ferramenta não se aplica, originando um dos objetivos deste projeto: o desenvolvimento de novas ferramentas de avaliação da estabilidade do processo. A verificação da uniformidade no comprimento do arco através da tensão média e seu desvio padrão foi utilizada por Rasajekaram [80] em seu trabalho com corrente pulsada. Como o CCC também trabalha em imposição de corrente, este índice também pode ser utilizado.

2.6 - O Processo MIG/MAG em Transferência Metálica por Curto-circuito com Controle da Corrente (MIG/MAG TMCCC)

2.6.1 - Fundamentos

Como já mencionado, a variante do processo MIG/MAG em transferência metálica por curto-circuito (excluindo-se o caso do chamado controle externo), na qual a corrente é a variável de controle, vem sendo estudada já há mais de duas décadas, tendo os métodos de controle e os equipamentos apresentado melhorias contínuas. Como pode ser verificado no item Justificativa, os motivos que levaram e levam ao desenvolvimento dessa variante são inúmeros, dependendo da aplicação, e englobam não só aspectos técnicos, mas também econômicos e sociais.

No início, as pesquisas buscavam um processo com as vantagens da transferência metálica por curto-circuito (menor aporte térmico e menor nível de tensões residuais, menor gasto de energia, menor custo de gás, principalmente no Japão, menor nível de hidrogênio difusível, solda fora de posição), suprimindo os inconvenientes do processo convencional, como excesso de respingos e irregularidade na transferência metálica [4,49,50,82]. O menor aporte térmico (5 % a 20 %) e maior rendimento (η) do processo se devem ao menor sobreaquecimento da poça e da gota, em relação ao MIG/MAG convencional em curto-circuito [40,44,90], mas a maior V_s atribuída ao MIG/MAG TMCCC também pode ter contribuído para essa afirmação. Este assunto é abordado detalhadamente nos resultados. Com o refinamento das técnicas, novos objetivos foram sendo almejados, como controle do aporte térmico e controle da penetração independentemente da velocidade de arame.

De uma maneira geral, o funcionamento destes sistemas se baseia na garantia de que o contato entre a gota metálica e a poça de fusão ocorra em baixo nível de corrente, no fornecimento de uma corrente responsável pela transferência da gota, e na redução de corrente antes que a ponte metálica se rompa e a gota se transfira. A Figura 2.24 exemplifica algumas formas de onda ($I \times t$) de corrente adotadas [41,46,51,72,86,90].

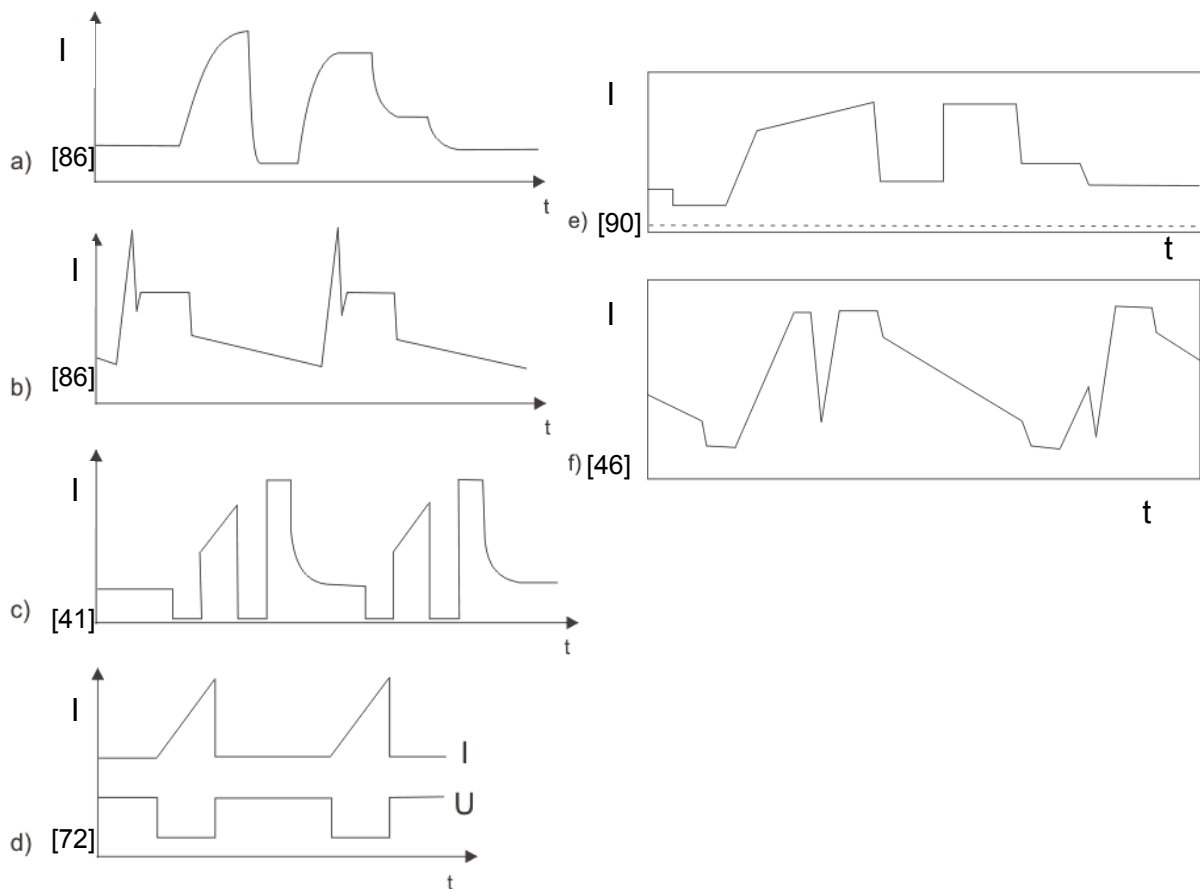


Figura 2.24 - Formas de onda de corrente (I) de diversos sistemas de soldagem MIG/MAG TMCCC. c) e d) mostram, também, o comportamento da tensão (U) de soldagem. [41,51,72,86,90]

Para que se possa obter um real controle do processo, todas as técnicas lançam mão de alguma estratégia de monitoração e realimentação, assim permitindo que ele se ajuste à condição instantânea da operação, respondendo a oscilações impostas à configuração de soldagem. Obviamente, isso é possível dentro de limites práticos. Como descrito no item 2.5.3 e no item Justificativa, o processo MIG/MAG convencional não é capaz de responder a estas oscilações, o que acarreta em instabilidade na solda. No processo apresentado na Figura 2.24 d) [72], por exemplo, a tensão é continuamente lida. Quando cai abaixo de um determinado valor que caracterize o curto-circuito, o sistema impõe uma rampa de corrente, com inclinação determinada. Assim que se detecta a ultrapassagem, pela tensão, daquele valor de curto-circuito, o sistema percebe seu fim e impõe uma corrente de arco.

Em processos mais modernos, como o mostrado na Figura 2.24 c), há uma maior complexidade. A forma de onda pode ser descrita como sendo composta por fases, abordadas por vários autores [43,44,47,49,50,51,90]. Esta é, também, a concepção do CCC.

A Figura 2.25 abaixo mostra, esquematicamente, essas fases.

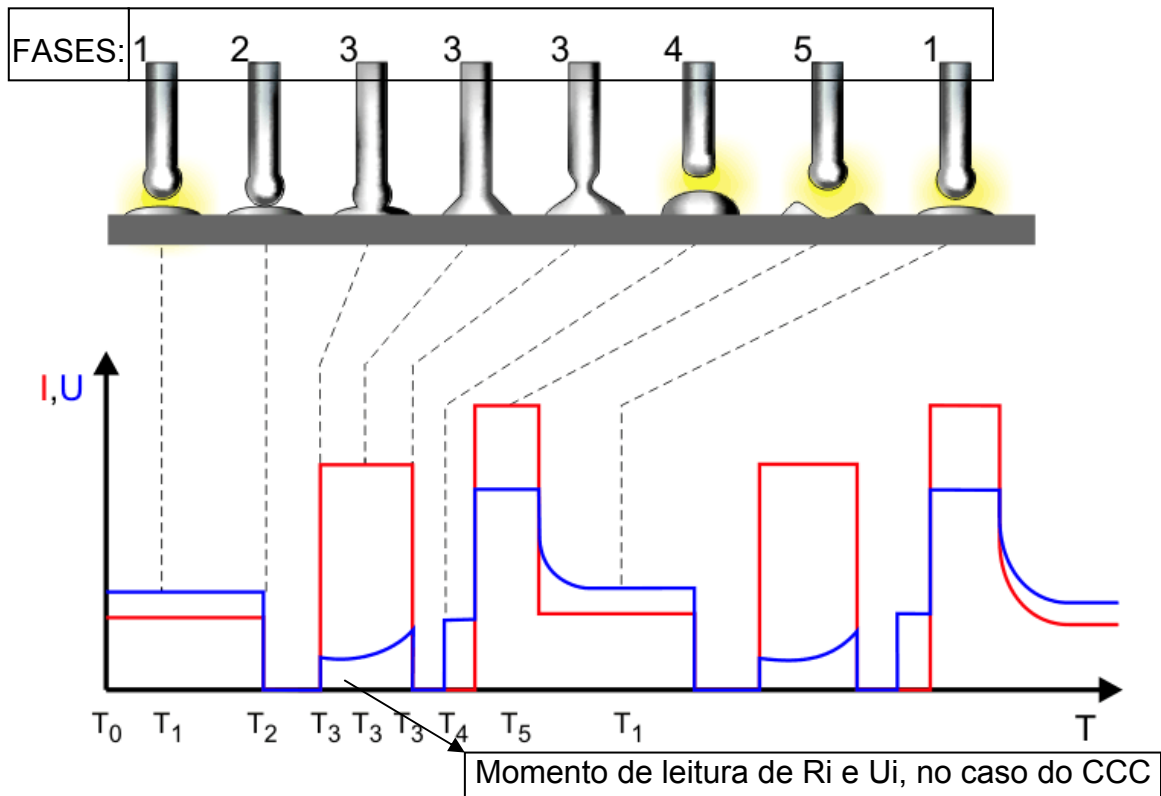


Figura 2.25 - Fases básicas de sistemas MIG/MAG TMCCC modernos.

A fase 1 é a fase de arco aberto. A corrente é mantida em patamar baixo, porém garantindo o aquecimento dos eletrodos (gota e poça) e a fluidez dos mesmos, assim como a manutenção do arco. Segundo a literatura, uma corrente excessivamente baixa pode causar solidificação das partes fundidas e instabilidades na operação. Esta fase também é citada como responsável pelo “controle fino” do aporte térmico [41,49,50,51].

O processo vai para a fase 2 quando a tensão cai abaixo da chamada tensão de curto-circuito (U_{cc}), normalmente 12 V, caracterizando o contato entre a gota e a poça metálica. Alguns autores sugerem que a corrente deve cair antes do contato, porém não explicam como ele é detectado [42,38]. Cogitou-se, no LABSOLDA, que isto poderia ser conseguido por métodos estatísticos. Nesta fase, a corrente é reduzida ainda mais, reduzindo a tendência a se gerarem respingos, deixando que a gota se assente suavemente. Considera-se, aqui, o exposto no sub-capítulo anterior,

que cita o fato de que, nos primeiros momentos do curto-circuito, a força da tensão superficial é preponderante sobre a dinâmica da transferência da gota. Daí se origina um dos nomes que existem no mercado, o STT (*Surface Tension Transfer*, ou Transferência por Tensão Superficial) [49]. Permanece na fase 2 por um tempo ajustado, após o qual, inicia-se a fase 3.

A fase 3 é caracterizada por uma alta corrente, que gera as forças magnéticas que atuarão no destacamento da gota (efeito Pinch). Nesta fase, ocorre a aquisição dos sinais que traduzirão a situação momentânea da solda, e que serão realimentados ao sistema, o qual atuará no intuito de manter a estabilidade. Um desses sinais reflete a situação geométrica da ponte metálica, e tem como função informar a iminência da reabertura do arco. Quando esta iminência for detectada, a corrente deve ser reduzida à da fase 4, reduzindo a tendência a respingos, inerente a esse momento. O sistema comercial mais conhecido utiliza o sinal de variação de tensão (dU/dt) para isso. (Como será visto adiante, o CCC utiliza o sinal de resistência, R_i .) Quando esse valor ultrapassa um valor estipulado, é detectada a iminência de reabertura [49,51]. O outro sinal adquirido reflete a DBP, podendo ser de tensão ou de resistência. (Como será visto adiante, o CCC utiliza o sinal de tensão, U_i .)

A fase 4 também tem um tempo estipulado e é nela que deve ocorrer a reabertura do arco, em corrente baixa.

A fase 5 é composta por um pulso de corrente, destinado à formação de uma nova gota metálica na ponta do arame-eletrodo. A energia deste pulso deve corresponder à necessária para que se forme uma gota de mesmo tamanho que a anterior. Para isso, o sistema utiliza a informação de DBP lida na fase 3. Há, na literatura, certas contradições, inclusive entre artigos do mesmo fabricante, quanto a funções adicionais da fase 5. Cita-se que ela também seria responsável pelo controle do aporte térmico, ou então apenas pela penetração [40,49], ou por ambos [47], além de causar uma depressão na poça, evitando contato prematuro desta com a gota em formação [46,51].

À forma da transição da fase 5 para a fase 1 são atribuídas as funções de amortecimento da poça, pela redução suave da corrente, e de “controle grosseiro” do aporte térmico [40,49,50] e fluidez do material fundido. Esta transição é conhecida por *tail out*.

Algumas dessas questões puderam ser verificadas no decorrer deste trabalho, como observado nos resultados. Outras, porém, necessitariam da

aplicação de filmagem em alta velocidade para serem estudadas. Além da falta deste equipamento, a grande dificuldade do trabalho foi a falta de informações sobre esse tipo de processo. As explicações sobre as funções e valores de tempo e corrente das fases são genéricas e vagas. As informações se restringem a situações específicas de solda, não abrangendo, por exemplo, uma variedade de materiais, gases, etc...A forma de atuação do controle também não é abordada profundamente.

2.6.2 - Aplicações

O processo CCC é destinado, em princípio, àquelas operações que requerem as características presentes no processo MIG/MAG convencional, em transferência metálica por curto-circuito. Por vezes, porém, sua aplicação está ligada à sua habilidade em obter resultados que ficam entre os obtidos com MIG/MAG convencional em transferência por curto-circuito e os obtidos com outra variante, ou que extrapolam a faixa de aplicabilidade do primeiro. Por exemplo: apesar do baixo aporte térmico e conseqüente possibilidade de soldar menores espessuras, estas estão limitadas a um mínimo no MIG/MAG convencional em curto-circuito. Pesquisas recentes, conduzidas na Alemanha, com um sistema MIG/MAG TMCCC, designado por Chop Arc, obtiveram boas soldas em espessuras de 0,2 mm, em aço [91]. Um outro exemplo de versatilidade é mostrado em [86]. Para a soldagem de ligas de Magnésio, foi tentado o processo MIG/MAG em corrente pulsada e em curto circuito. Ambos apresentaram dificuldades que proibiram seu uso. A solução foi, então, a aplicação do processo MIG/MAG em curto circuito e controle de corrente, cuja forma de onda está na Figura 2.24 b).

O passe de raiz na união de topo de dutos de parede espessa consiste em uma das aplicações mais freqüentemente citadas do MIG/MAG TMCCC. Seu uso, tanto semi-automaticamente, como totalmente mecanizado, é citado em inúmeros artigos técnicos [40,49,83]. Existem citações de aplicação também em aço inoxidável para construção automotiva, vasos de pressão, trocadores de calor, fabricação de motocicletas, etc... [38,40,42,84]. Também são citados ensaios destrutivos e não-destrutivos, comprovando a eficácia do MIG/MAG TMCCC [40]. Quando há alterações na configuração da solda, a forma de onda (variáveis e parâmetros) deve ser adequada [20,42,44], devendo haver uma metodologia para essa tarefa (não houve menção desta metodologia nos trabalhos revisados).

2.6.3 - Experiência do LABSOLDA

O CCC já vinha sendo estudado e desenvolvido no LABSOLDA, tendo sido abordado em duas teses do doutorado, em trabalhos de parceria com a PETROBRAS e em projetos de iniciação científica. A importância e pertinência de sua continuidade foram verificadas pelos resultados até então gerados e em diálogos com o setor industrial.

Gohr [30], em sua tese, descreveu a primeira tentativa prática de gerar o CCC, objetivando, principalmente, a redução do nível de respingos. Este primeiro conceito utilizava um circuito eletrônico, o qual monitorava a tensão e, de acordo com a mesma, estipulava a passagem ou não de corrente pelo circuito de soldagem (Figura 2.26).

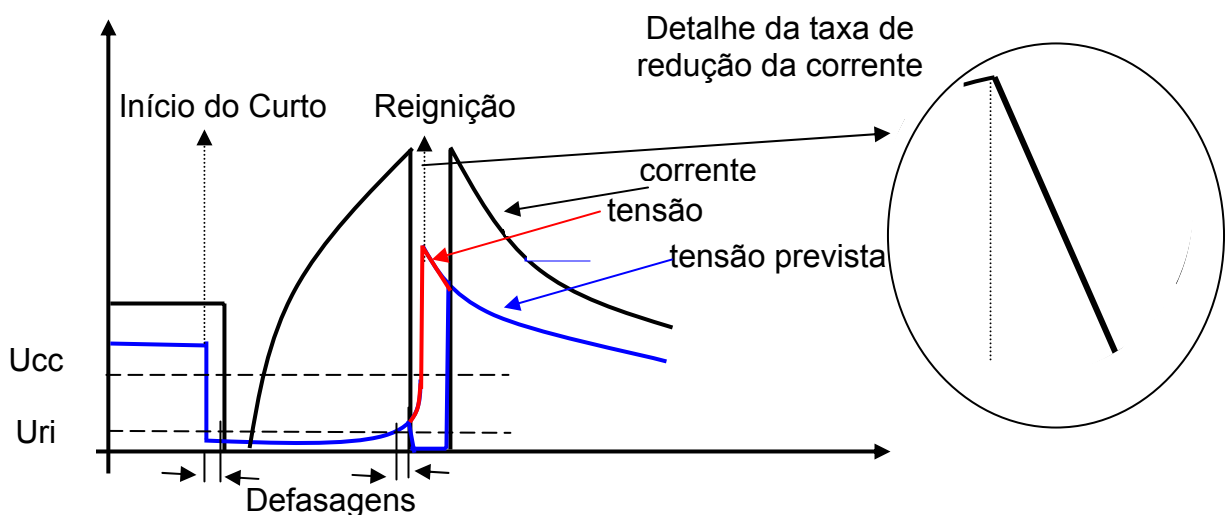


Figura 2.26 - Forma de onda de corrente com o circuito de redução de corrente. [30]

Ou seja, no momento onde a tensão caía abaixo da estipulada como sendo de curto-circuito (U_{cc}), o sistema desviava a corrente do circuito de soldagem, fechando uma chave paralela ao mesmo por um determinado tempo. Do mesmo modo, esta chave, um IGBT comandado por um sistema de controle, anulava a corrente de soldagem quando a tensão ultrapassava um limite estipulado como iminência de abertura de arco (U_{ri}), também por um tempo estipulado. Problemas surgiram devido à baixa taxa de redução da corrente e ao fato de que, quando havia alteração na DBP, o circuito de redução de corrente se confundia e considerava iminência de reabertura quando esta, na realidade, não ocorria. A ausência de corrente no momento de reabertura do arco também se tornou problemática, pois por vezes o arco reacendia, outras não. Não foi encontrada uma explicação para isso, sendo que Gohr [30] sugeriu filmagem em alta velocidade para melhor investigação.

Em face desses inconvenientes, e devido a maior flexibilidade do controle por software, esse foi o caminho adotado em diante. Em seu texto, Gohr [30] descreve o funcionamento do algoritmo de controle e as pesquisas que levaram a definição das estratégias de controle utilizadas desde então. Neste sentido, pesquisou o comportamento da resistência na fase 3 (Figura 2.27), verificando um momento adequado para leitura da resistência (R_i). Observou, também, a validade do relacionamento entre a tensão de curto-circuito, revelando a DBP, e tempos da fase 5 que manteriam uma transferência estável, para uma mesma corrente. (Figura 2.28). Também sugeriu novas formas de onda que poderiam ser investigadas.

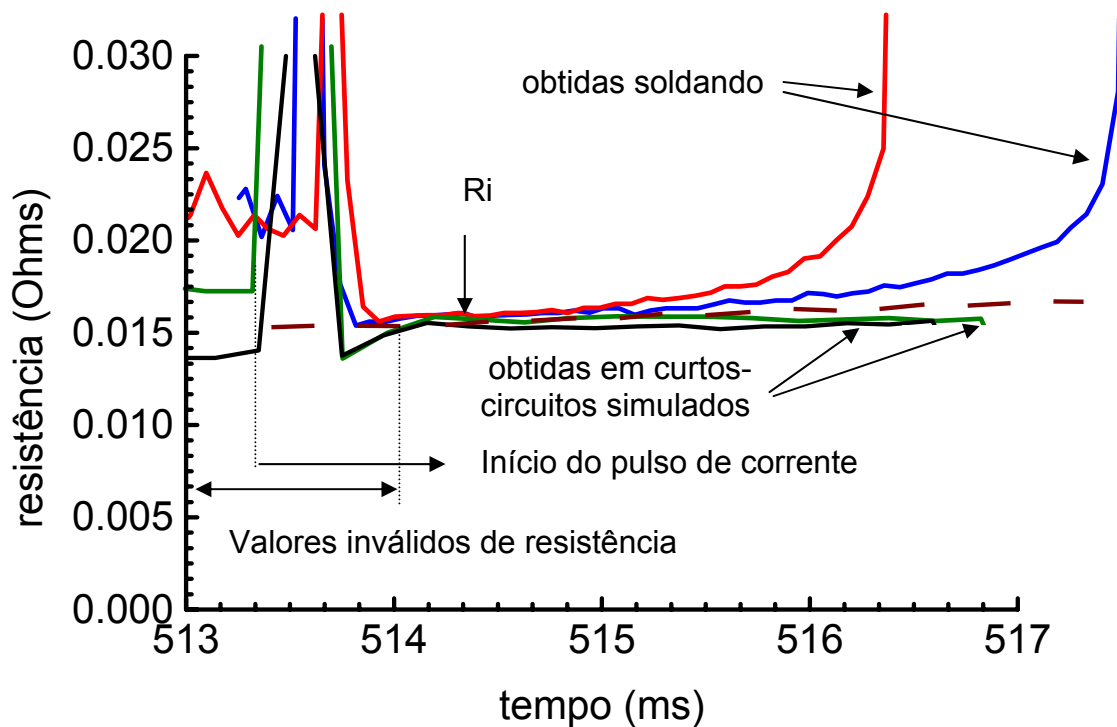


Figura 2.27 - Comparação da resistência do arame durante o curto-circuito em solda e simulações de curto. [30]

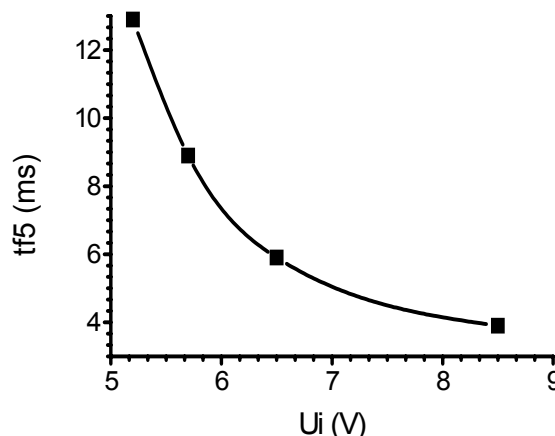


Figura 2.28 - Relação entre tensão de curto-circuito (U_i) e tempo da fase 5 (tf_5). [30]

Em suas pesquisas, Baixo [20] abordou o processo de soldagem em si, os aspectos da transferência metálica, adotando, nos ensaios, várias configurações possíveis. Estabeleceu relacionamentos entre energia fornecida pela máquina e velocidade de adição de material, e entre aquela e o volume fundido na fase de arco da forma de onda do CCC. Utilizou como critério de estabilidade a produção de salpicos e a não descaracterização da forma de onda por ocorrência de curtos-circuitos em momentos inadequados. O foco não foi a determinação de um método realimentado de autocorreção (ou ajuste) do processo, e também não envolveu investigações que envolvessem controle de aporte térmico, penetração e regulagem do tamanho de gota. Utilizando uma forma de onda em três níveis, obteve bons resultados, no que tange a regularidade do processo, como visto na Figura 2.29, abaixo.

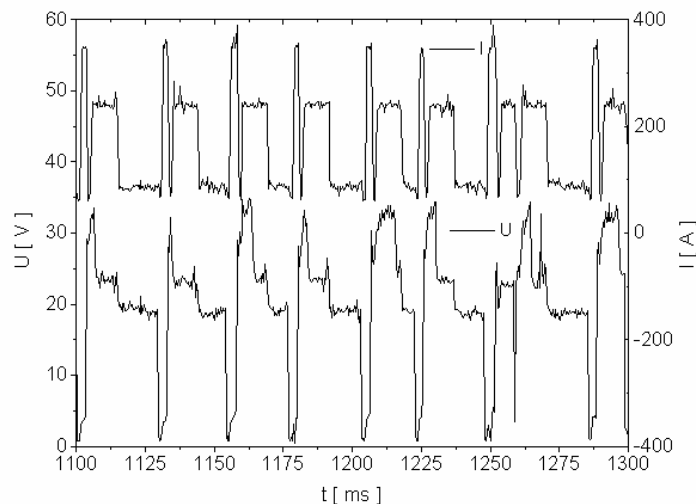


Figura 2.29 - Oscilogramas de tensão (U) e de corrente (I) representativos de uma soldagem estável na transferência por curto-circuito com controle da forma de onda em três níveis de corrente. [20].

Baixo também realizou alguns ensaios em juntas chanfradas que simulavam a união de dutos. Àquela época, no entanto, não se deu seqüência a essa aplicação.

3 - Objetivos e Justificativas

3.1 - Objetivos

Globalmente, este trabalho pretende viabilizar a introdução do processo MIG/MAG na realização do passe de raiz em soldas de topo de tubos API 5L, na fabricação *offshore* de linhas dutoviárias petrolíferas, garantindo-se a qualidade da raiz. Isto se possibilita através da disponibilização de um equipamento com tecnologia adequada, assim como de procedimentos dedicados. Ambos, por sua vez, resultarão de profunda assimilação e geração de conhecimento acerca do processo MIG/MAG em aspectos relativos ao problema abordado.

As vantagens do processo MIG/MAG em relação ao Eletrodo Revestido, atualmente utilizado nesta operação, em termos de produtividade, são claras e justificam tal substituição. Para isso, porém, características do processo MIG/MAG devem ser adequadas, o que se dá pela introdução de modernas técnicas de controle, resultando numa nova variante do processo clássico. Surge, então, o processo MIG/MAG em transferência metálica por curto-circuito com controle de corrente (CCC).

Na busca pelo resultado final acima citado, objetivos específicos devem ser cumpridos ao longo da trajetória dos trabalhos.

Como mencionado, o trabalho trata do desenvolvimento de uma variação relativamente inovadora do processo MIG/MAG em transferência metálica por curto-circuito, a qual, por conseguinte, apresenta relações com o processo convencional, em termos de influência de variáveis e parâmetros do processo. Sendo assim, primeiramente, objetiva-se a aquisição de conhecimento tecnológico e científico sobre o processo MIG/MAG convencional, em transferência metálica por curto-circuito. Aspectos relativos à formação da gota metálica no período de arco, mecanismos de penetração, variações na corrente média, influência de variações na distancia bico de contato-peça (DBP), influência do gás de proteção e outros devem ser identificados e analisados, transpondo-se, posteriormente, o conhecimento gerado para o desenvolvimento da variante em questão (CCC). Nestes testes, pretende-se definir a mistura gasosa a ser adotada para a continuidade dos ensaios com o CCC, levando-se em consideração, além de aspectos técnicos, também os econômicos.

Uma vez que a bancada de ensaios para o CCC já se encontra desenvolvida e disponível, a próxima meta é identificar e realizar melhorias em *hardware* e *software* que possibilitem um maior refinamento dos resultados. Como já mencionado, o CCC já havia sido abordado em trabalho conjunto do LABSOLDA e PETROBRAS [8] e em duas teses de doutorado realizadas no LABSOLDA por Baixo [20] e Gohr [30]. O primeiro enfatizou aspectos de processo e o segundo, tanto aspectos do processo como o desenvolvimento da bancada. Nenhum dos dois, no entanto, aprofundou seus trabalhos em questões mais detalhadas do CCC, como o controle do tamanho de gota e monitoração rígida do curso da transferência metálica, tendo buscado a estabilidade através de análises visuais da operação de solda. Assim, modificações nos *softwares* de controle e de aquisição e tratamento de dados devem ser realizadas, assim como no *hardware* envolvido, a fim de se gerarem meios de quantificação da estabilidade do processo. Além disso, deve-se gerar meios para medição de variáveis e parâmetros de soldagem ao longo da solda e suas variações, informações estas indispensáveis para o direcionamento dos trabalhos.

De posse dessas ferramentas, visa-se estudar as diferentes formas de onda de corrente que podem ser adotadas, inclusive valores de variáveis e parâmetros, a fim de se adotar uma. Como citado, estudos anteriores realizados no LABSOLDA nortearam consideravelmente as decisões a esse respeito. Todavia, outras formas de onda devem ser avaliadas, levando-se em consideração, também, informações da literatura científica e tecnológica.

Dentro da filosofia do CCC, então, serão geradas relações entre as variações na DBP (traduzidas em valores de tensão), e a energia necessária na fase de formação da gota metálica, para que se mantenha a regularidade da transferência metálica e mínima variação da corrente média. A variação da DBP é inerente ao passe de raiz, pois o movimento de tecimento é comumente adotado. No caso do processo MIG/MAG convencional, a regularidade da transferência metálica se vê prejudicada e a variação substancial da corrente média é inevitável com a variação da DBP, como será visto.

Pretende-se estabelecer estas relações para a posição 5G (se necessárias alterações em relação à posição plana, 1G) e diversos tamanhos de gota, esperando-se possibilitar, com isso, a regulagem da penetração.

Como meta seguinte, tem-se a incorporação dessas relações no sistema de controle realimentado do processo, e a comparação de performance com o

MIG/MAG convencional. Serão abordados aspectos como qualidade da solda e produtividade, em corpos de prova (CPs) chanfrados, simulando a situação real. Primeiramente, será abordada a posição plana (1G), passando-se para a posição 5G (eixo do tubo horizontal, solda descendente).

Finalmente, visa-se a incorporação do resultado em um equipamento comercial, sua requisição de patente junto ao INPI, e sua aplicação e avaliação em campo.

Uma comparação entre o processo estabelecido (ER) e o eventual candidato a substituto (CCC) se torna primordial quando se intenciona a quebra de um paradigma, especialmente em se tratando de soldagem, para que se justifique tal mudança e todas as conseqüências agregadas, como renovação do maquinário e re-treinamento de pessoal. Sendo assim, também se objetivam comparações entre o desempenho do ER e do CCC.

3.2 - Justificativa

Apesar dos avanços que impulsionaram a tecnologia da soldagem, algumas aplicações industriais ainda não absorveram as evidentes e já consolidadas vantagens disponibilizadas pela semi-automatização desse processo de fabricação, que culminam num aumento da produtividade e redução de custos. Como já mencionado, um exemplo é a solda de raiz na de união de dutos. Inevitavelmente, pergunta-se porque isso acontece. A resposta se direciona, principalmente, para a tradição, um fator que, embora se esteja tratando de um mercado de alta tecnologia, tem forte influência nas decisões tomadas.

Trabalhos técnicos provenientes de empresas do ramo de soldagem concordam que, cada vez mais, processos semi-automáticos e totalmente automatizados estão sendo adotados na solda de tubulações, e também reconhecem as vantagens dos últimos. Todavia, ao mesmo tempo, e curiosamente, afirmam, omitindo justificativas, que o Eletrodo Revestido ainda é o processo de escolha [7,14,32], preconizando, implicitamente, seu uso. Outras fontes citam explicações: simplicidade, baixo custo e menores dimensões de equipamento, ausência de tracionadores de arame, resistência a ventos, etc... Outro fator citado é a interpretação errônea das normas de soldagem de dutos, concluindo que o processo MIG/MAG não pode ser utilizado para essa solda. Tendo o procedimento sido devidamente qualificado, ele pode, sim, ser utilizado. Questões relativas a

custos de treinamento de soldadores no processo MIG/MAG, custos de desenvolvimento dos procedimentos, e à burocracia advinda da necessidade de homologação desses novos procedimentos também são citadas como complicadores, assim como o receio dos soldadores de que a maior rapidez nos trabalhos irá comprometer sua colocação e rendimentos [9,32,33,34,39]. Como detalhado a seguir, todas as aparentemente insuperáveis vantagens do Eletrodo Revestido acima citadas podem ser sobrepujadas pelo MIG/MAG, principalmente aquelas concernentes a custos. Naturalmente, requisitos para isso são a disponibilidade de uma variante do MIG/MAG com tecnologia adequada, e uma eficiente sinergia entre o engenheiro e o soldador.

Por si só, o aumento drástico em produtividade a ser alcançado pela introdução do processo MIG/MAG na operação a ser atacada, garantindo-se a alta qualidade requerida na solda, já seria uma justificativa contundente, pois o passe de raiz é determinante tanto para a resistência, quanto para o custo da construção *offshore* de tubulações petrolíferas, influenciando na viabilidade econômica das mesmas [40,41,43,44]. Estimativas provenientes de verificações em campo e em laboratório, levantadas numa parceria entre o LABSOLDA e o CENPES/PETROBRAS, revelam um potencial de redução de tempo, para um determinado passe de raiz, de 8 minutos para 3 minutos, ganho este advindo, principalmente, da eliminação de tempos secundários de esmerilhamento (em todas as paradas e reaberturas de arco) de mordeduras e de retirada de escória, inerentes ao ER [8]. A questão da necessidade de treinamento de soldadores também é abordada neste mesmo relatório. Cita-se que, embora os soldadores estivessem fortemente acostumados com o ER celulósico, a adaptação ao MIG/MAG foi extremamente rápida. O mesmo documento de Baixo [8], porém, menciona a necessidade de melhorias no processo, a fim de viabilizar e melhor justificar a almejada substituição. Surge, então, a consideração do CCC. Esta facilidade de adaptação já observada no MIG/MAG convencional é potencializada pelo CCC, pois o controle da poça é mais fácil, aparecendo na literatura a expressão *one day training* para sistemas como este, tendendo a facilitar obtenção de mão-de-obra [42,43,44,49,90]. Ademais, a solda de dutos *offshore* é realizada sobre balsas, e o movimento de sobe e desce da embarcação é transmitido à junta. Por isso, é importante essa facilidade de operação, que foi verificada em ensaios do CCC no LABSOLDA..

Em relação ao ER, a literatura apresenta diversas vantagens técnicas e econômicas de sistemas MIG/MAG TMCCC, como o CCC, as quais o presente

trabalho pretende verificar. Primeiramente, porém, deve-se garantir que a solda terá qualidade aceitável, em conformidade com as normas. Segundo a literatura, isto é alcançado por sistemas MIG/MAG TMCCC [40,41,42,44].

Embora o ER também trabalhe com corrente constante, há uma tendência a flutuações na taxa de deposição (conforme a vareta se consome) e no calor à peça (pois há grande variação nos volumes das gotas transferidas, e, como visto anteriormente, estas são grandes responsáveis pela energia à peça) podendo causar irregularidades na geometria do cordão. Outra desvantagem do ER, inerente ao tipo de processo, é a já citada formação de escória, que, além dos tempos secundários, pode causar inclusões. Inclusões podem ser acentuadas, também, pelo elevado nível de respingos do ER. Do mesmo modo, o especial cuidado a ser tomado na estocagem e manipulação dos eletrodos revestidos, é um fator complicador [26,32,38]. A necessidade de um ambiente confinado para o uso do MIG/MAG poderia ser citada como uma desvantagem deste processo, mas no caso do problema atacado, as soldas já são realizadas num ambiente protegido. Para outros casos, porém, investimentos advindos desta necessidade devem fazer parte do estudo da relação custo/benefício de introdução do MIG/MAG.

Sendo uma das premissas dessa tecnologia, o CCC reduz drasticamente o nível de respingos, eliminando tempos de retrabalho e limpeza de dispositivos de fixação, ora utilizados. Aumenta-se o conforto e segurança do soldador, pois se elimina o metal em alta temperatura voando pelo ambiente. Aumenta-se o rendimento de deposição, pois menos material é perdido em forma de respingo. Melhora-se a visualização da poça, favorecendo seu controle pelo soldador, o que é acentuado pela menor geração de fumos atribuída ao CCC.

Melhor molhabilidade, melhor geometria do passe e reforço da raiz, melhorando a resistência à fadiga também são citados [53,54]. Na Figura 5.28, dos resultados, compara-se o passe de raiz obtido com CCC e com eletrodo revestido celulósico, evidenciando a eliminação de mordeduras inerentes ao segundo e melhorando a geometria do reforço da raiz. Pode-se obter melhor resistência à fadiga também pela menor distorção das peças.

A redução da necessidade de *backings* cerâmicos ou de cobre pelo MIG/MAG TMCCC evita a contaminação do metal de solda, o que poderia levar à corrosão interna [32,41,43].

Pode-se citar, ainda, maior taxa de deposição, maior fator de trabalho, possibilidade de mecanização [4] e menor hidrogênio no metal de solda, reduzindo a

susceptibilidade a trincas [83]. O hidrogênio está presente na composição do revestimento celulósico e em revestimentos básicos (quando erroneamente manipulados), sendo estes os tipos de revestimento os mais aplicados em passes de raiz de dutos [32,41,83].

O MIG/MAG convencional por curto-circuito (controle de tensão) apresenta oscilações consideráveis da corrente média como será visto na Figura 5.6. Adicionalmente, quando se impõe o movimento de tecimento à tocha de soldagem, como é usual no passe de raiz, há também variação na frequência de transferência de gotas, que juntamente com a variação da DBP, ocasiona a variação da corrente e tensão de soldagem [4,49,51,52]. Surge a tendência à falta de fusão ou *suck back* (excessiva fluidez da poça e recuo do reforço da raiz) localizados [40,42,43,44]. Esses fatores dificultam o controle da operação pelo soldador, exigindo excessivo treinamento e experiência. O CCC propicia menores variações na corrente média, e regularidade na transferência metálica, resultando em maior homogeneidade na geometria da solda e conseqüente maior resistência à fadiga [30,41,44,49,53]. Com a utilização de maiores concentrações de CO₂ no gás de proteção, ou do CO₂ puro, este fato se torna mais crítico ainda, pois se eleva a tendência à instabilidade do processo. O CCC viabiliza o uso de CO₂ puro ou misturas com alto teor de CO₂.

Com considerável menor incidência de respingos, além dos mesmos ganhos em relação ao ER citados acima, adiciona-se o fato de o tempo até ser necessária uma parada para limpeza do bocal da tocha é estendido e se reduz a probabilidade de contaminação da solda, quando o fluxo de gás de proteção é perturbado por respingos aderidos ao bocal [37,40,41,48,49,50,51,56]. É citado na literatura um potencial para melhoria de resultados quando do uso de eletrodos de maiores diâmetros [11,49]. A possibilidade de maior velocidade de soldagem também é bem destacada em alguns trabalhos [9,45,48].

É mencionada a regulagem da corrente independentemente da velocidade de arame, com conseqüente possibilidade de regulagem do aporte de calor e da penetração e melhor controle da poça metálica fundida e menor emissão de fumos, o que reduz, juntamente com a redução de respingos, a insalubridade do ambiente para o soldador [40,41,43,44,47,49,50,51].

Basicamente, os fatores que restringem a aplicação do MIG/MAG em corrente pulsada ou em transferência goticular axial para o passe de raiz são a dificuldade de acesso do metal de adição ao fundo do chanfro e um excesso de energia (causando excesso de fusão (*burn through*) e mordeduras [8]), respectivamente. A soldagem

MIG/MAG em transferência metálica por curto-circuito, em geral, apresenta uma menor aporte térmico, poça pequena, com solidificação rápida (*fast freezing*), adequada ao passe de raiz [10,36,50].

Inseridos no cenário de franca expansão do setor de Petróleo e Gás no Brasil, os ganhos previstos pelo projeto acarretam não apenas em diferencial produtivo, mas numa boa contribuição para a manutenção do Brasil em sua já alçada boa posição mundial em tecnologia neste setor. O salto em produção vislumbrado pela maior companhia brasileira do setor, a PETROBRAS, alcançando 2,27 milhões de barris de óleo equivalente por dia em 2005, certamente demandará incremento e manutenção em sua já extensa malha dutoviária, atualmente com 15700 km, onde a introdução de procedimentos e tecnologia de soldagem otimizados, permitindo maior produtividade, seria deveras interessante. De fato, há previsão para que se dobre a extensão atual, como citado pelo Eng. Marcelino Guedes Gomes, Gerente de Tecnologia de Dutos da Transpetro, subsidiária da PETROBRAS:

“A PETROBRAS está desenvolvendo um ambicioso programa para, praticamente, dobrar a extensão de sua malha de dutos [...]. Ao mesmo tempo em que é requisitada pelo Programa da Integridade de Dutos a atingir uma probabilidade mínima de falhas estruturais”.

Tendo em vista os altos custos, como o de aluguel de balsas lançadoras de dutos, o ganho em produtividade se torna um importante subsídio quando da tomada de decisão envolvendo o processo de soldagem a ser aplicado. Em vista disso, a mesma empresa reconhece a atratividade da introdução do processo MIG/MAG (também chamado GMAW) em detrimento do Eletrodo Revestido (também chamado SMAW), através do Eng. Raimundo Cabral de Medeiros:

“Quanto ao aluguel da barcaça podemos assumir o valor médio de US\$50 mil/dia. Desta forma, o emprego do processo de soldagem GMAW apresenta grande atratividade frente ao SMAW”.

Ademais, haja vista que 75% da produção da PETROBRAS se encontra em ambiente marítimo, surge a necessidade de se reduzir a probabilidade estatística de vazamentos em dutos, em época de grande preocupação com a integridade do meio-ambiente. Também os prejuízos financeiros provenientes de acidentes devem ser considerados. Sendo o passe de raiz o mais crítico e susceptível a falhas, sua qualidade se torna fundamental quando o assunto segurança vem à tona. E quanto maior a confiabilidade na segurança deste meio de transporte de fluidos, um dos objetivos do CCC, melhor se justifica a expansão de sua aplicação. Os oleodutos,

gasodutos e polidutos são o meio mais econômico para transportar grandes volumes de petróleo, derivados e gás natural a grandes distâncias. Além disso, o sistema permite a retirada de circulação de centenas de caminhões e navios, economizando combustível e reduzindo o tráfego de veículos pesados nas rodovias. Resultado: melhora-se a circulação, preservam-se as estradas e diminui a emissão de gases tóxicos no ar e efluentes nas águas marinhas.

Não se pode deixar de mencionar a possibilidade de redução de importações, pois uma máquina com tecnologia similar àquela a ser desenvolvida neste trabalho (e serviços agregados) não é produzida no Brasil. Tal redução do fluxo de importações tende a gerar emprego, renda e minimizar a dependência tecnológica externa, transformando ciência e tecnologia em instrumento agregador de valores aos produtos internos. De fato, “[...] no caso do setor de petróleo e gás, dados do Instituto Nacional de Tecnologia indicam que há um potencial de importações a serem substituídas que atinge US\$ 1 bilhão por ano, do total de US\$ 3,2 bilhões de importações do setor”, segundo o então ministro da Ciência e Tecnologia Roberto Amaral. Reduz-se, então, o dispêndio cambial da indústria brasileira de petróleo, possibilitando a substituição de equipamentos (pois se objetiva a geração de uma fonte de soldagem nacional com a tecnologia CCC), matérias-primas importadas e dos serviços técnicos contratados no exterior por equivalentes nacionais. Nesta exata linha de pensamento, se insere a visível necessidade de aumento do volume de recursos humanos especializados no setor de Petróleo e Gás voltados às condições brasileiras. Isto se consegue através de criação e manutenção de centros de referência, como o LABSOLDA, os quais realizam o estudo continuado, promovem o avanço do estado da arte e propiciam aos colaboradores a vivência na área.

A competência institucional do LABSOLDA, tanto em termos de infra-estrutura como capacitação da equipe, não deixa de ser uma justificativa para o trabalho. O desenvolvimento próprio de equipamentos e instrumentação necessários às pesquisas coloca este laboratório na elite da pesquisa em soldagem brasileira. Na área de Petróleo e Gás, um exemplo recente é a aplicação de duas fontes desenvolvidas pelo LABSOLDA, dedicadas à soldagem submarina molhada, na qualificação de soldadores e posterior aplicação para reparos na plataforma P-27 da PETROBRAS.

Todavia, a relação do LABSOLDA com o tema Petróleo e Gás já apresenta considerável histórico, através de projetos CTPETRO, PADCT/CENPES, FINEP,

ANP, dissertações e teses. Basicamente, os temas abordados foram (ou são) a soldagem hiperbárica seca, soldagem molhada, soldagem TIG orbital de dutos e automatização de revestimentos metálicos em equipamentos da indústria petrolífera.

4 - Equipamentos, Materiais e Metodologia

4.1 - Equipamentos

Como citado anteriormente, o presente trabalho dá continuidade a uma linha de pesquisa que já vinha fazendo parte das atividades do LABSOLDA. Em assim sendo, a bancada de desenvolvimento, em termos de equipamentos, não sofreu grandes alterações.

A fonte de soldagem utilizada é uma INVERSAL 600, mutiprocesso, transistorizada, chaveada no secundário do transformador, operando em modo remoto e cujo controle é realizado por um micro-computador no qual roda o *software* de controle. Este micro-computador é chamado de “micro de controle”, e o *software* (linguagem Borland C++), cuja otimização foi um dos objetivos do trabalho, chama-se DIGI2000. Ao lado do “micro de controle”, opera o chamado “micro de monitoração”. Este micro-computador, dotado dos *softwares* dedicados OSCILOS e MIG/MAG, realiza a aquisição e tratamento de dados elétricos de soldagem, possibilitando a avaliação do processo. Para isso, dispõe de uma placa de aquisição e conversão de dados acoplada a sua placa mãe, chamada INTERDATA. Esta, por sua vez, recebe os sinais analógicos do TC-1, instrumento que adquire e trata os sinais dos transdutores de corrente (sensor de efeito Hall) e tensão, conectados apropriadamente ao circuito de soldagem. O TC-1 também fornece ao micro de controle estes sinais (*feedback*), materializando-se o sistema de controle realimentado que é a base do CCC (cujo funcionamento será detalhado em Resultados e Discussões).

Diferenciando-se dos trabalhos anteriores realizados por Baixo e Gohr, que utilizaram para deslocamento da tocha de soldagem o equipamento Tartílope V1, com um grau de liberdade, o presente trabalho aplicou o robô industrial de 6 eixos UP6, da marca japonesa MOTOMAN. Isto foi necessário devido a maior capacidade deste equipamento em obter posicionamentos e deslocamentos com maior agilidade, flexibilidade e repetibilidade. Considerando-se os objetivos do trabalho, que requeriam uma informação confiável quanto a DBP, essa habilidade do robô foi fundamental. A Figura 4.1 mostra os equipamentos da bancada de ensaios.

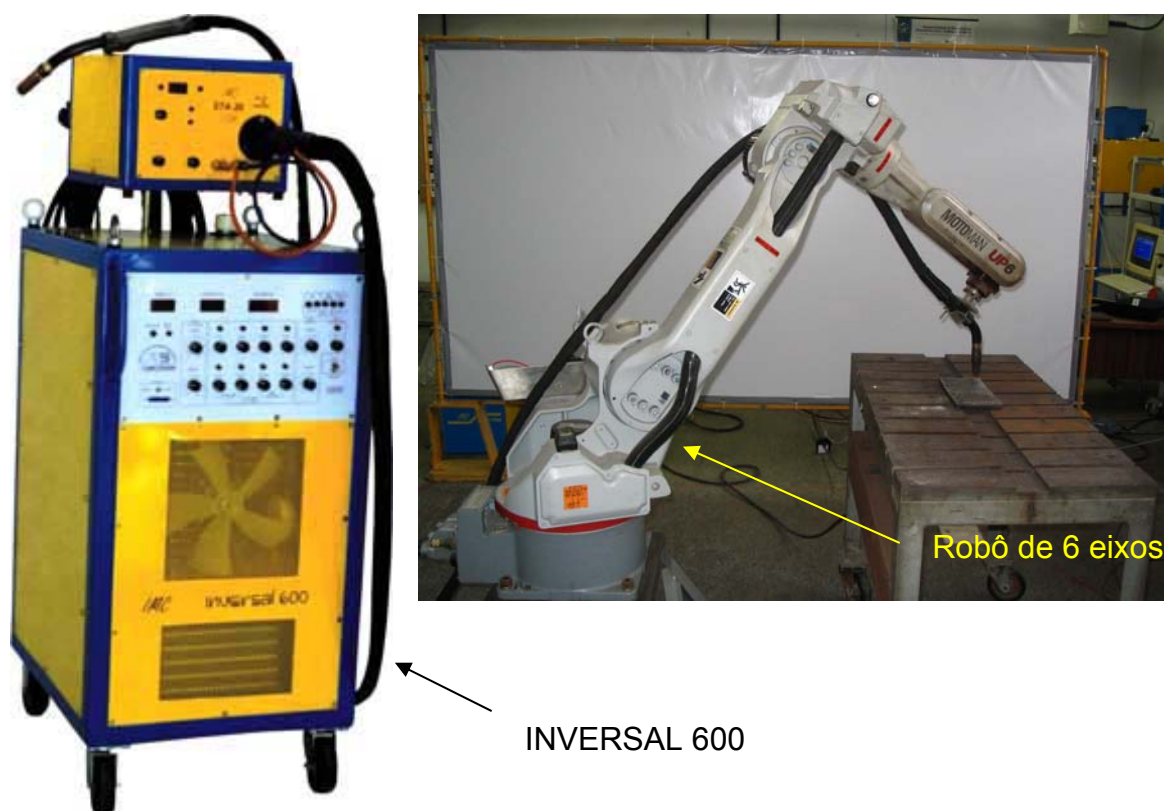


Figura 4.1 - Bancada de ensaios.

Também foi incorporado à bancada o analisador de gases M-6900, sistematicamente utilizado para análise do gás utilizado. Como esta adição ocorreu

após a adoção da mistura C-25, esta foi a única analisada dentro do projeto. A tabela de leituras é a seguinte:

Tabela 4.1 - Análise da composição do gás de proteção, C-25.

Data da leitura	Porcentagem de CO ₂ lida
20/7/2004	25,4 %
16/9/2004	25,3 %
10/12/2004	25,1 %

A preparação dos corpos de prova foi realizada com uma chanfradeira manual da marca Heck (Figura 4.2), o que propiciou qualidade, agilidade e repetibilidade à geometria das amostras.



Figura 4.2 - Chanfradeira manual utilizada.

O software de projeto mecânico AutoCAD foi utilizado para medição da penetração e análise da geometria da solda, como exemplifica a Figura 4.3.

À exceção do robô de 6 eixos, da chanfradeira, do analisador de gases, e do *software* AutoCAD, todos os equipamento e *softwares* citados foram desenvolvidos pelo próprio LABSOLDA. Isto conferiu alta flexibilidade ao desenvolvimento, fator fundamental quando se almeja um objetivo como o proposto.

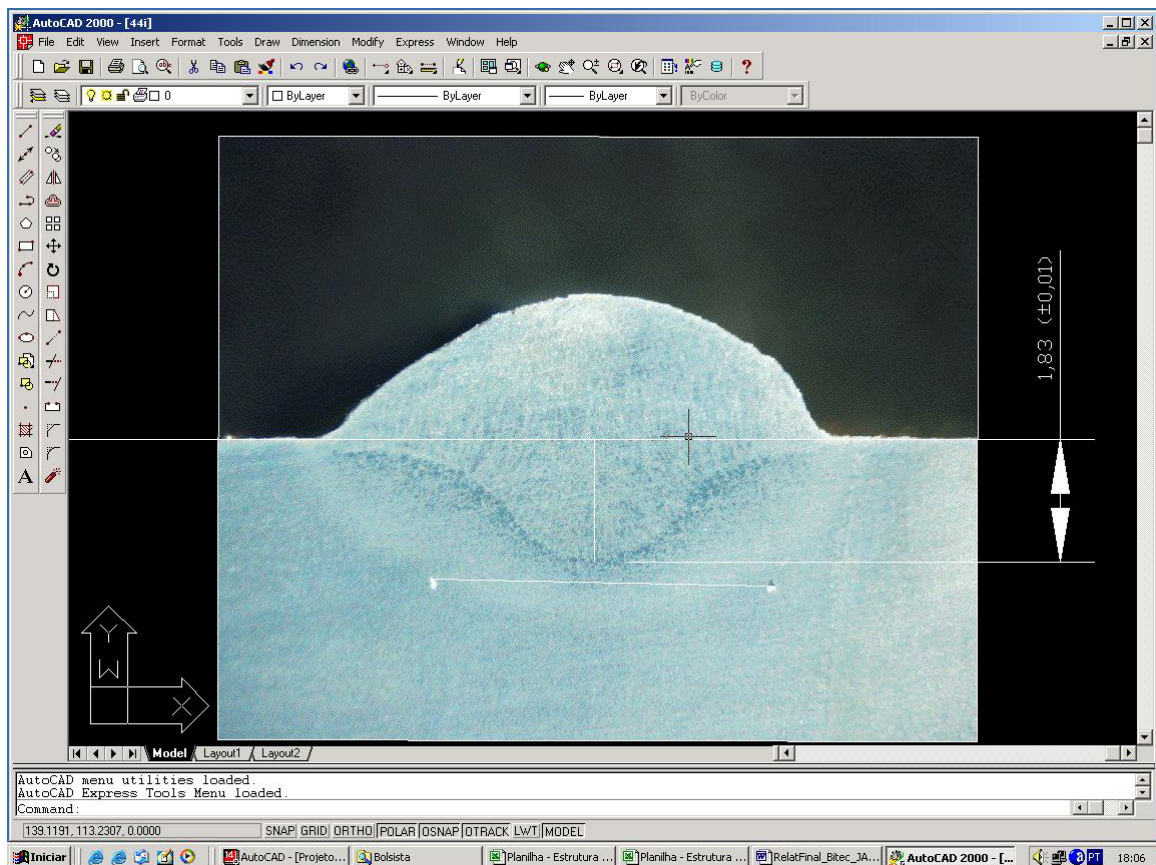


Figura 4.3 - Exemplo de uso do AutoCAD para análise de corpo de prova (CP).

4.2 - Questões Relativas a Normas

Como engenheiro, o autor reconhece que a busca pela normalização dos processos produtivos é uma necessidade fundamental, principalmente em tempos de globalização. A realidade atual, no entanto, é que ainda existe muito desconhecimento por parte dos próprios engenheiros em relação às profusas normas existentes, e a uniformização (ou, pelo menos, uma maior harmonia entre elas) ainda está longe de se concretizar. Sendo assim, na descrição dos materiais e dos ensaios, se utilizaram as nomenclaturas mais usuais no ambiente de pesquisa e produção, tanto na área da soldagem como na área do petróleo, tentando-se se ater às normas (nomeadas) quando considerado adequado.

No caso das normas para especificação dos requerimentos de qualidade da solda, foram adotadas a ASME para vasos de pressão e a AWS D1.1. Em relação à soldagem de dutos, especificações e qualificações de procedimentos de soldagem, qualificação de soldadores, descrição de defeitos e inspeção de soldas seguem a norma API 1104.

4.3 - Materiais

Pellizzaro [92], em suas investigações para determinação do material e forma de preparação de corpos de prova para testes, utilizou não só fatores técnicos, mas também econômicos como subsídios para tomada de decisão. Ele concluiu ser tecnicamente viável a utilização de barras chatas, em aço SAE 1020, de espessura 12,7 mm e largura 50,8 mm, as quais são chanfradas com uma chanfradeira manual. Essa opção provou ter menor custo do que a preparação de corpos de prova a partir de chapas de aço e oxicorte. O custo de gases do oxicorte foi o fator determinante. As barras adotadas simulam satisfatoriamente as juntas reais, em aço API 5L X60 e API 5L X 65 de espessura 12,7 mm e 14,3 mm, respectivamente. Para os depósitos sobre chapa foram utilizadas chapas de aço SAE 1020, com 12,7 mm de espessura. A geometria do chanfro, mostrada na Figura 4.4, está de acordo com as normas ASME para vasos de pressão, AWS D 1.1 e recomendações da API 1104.

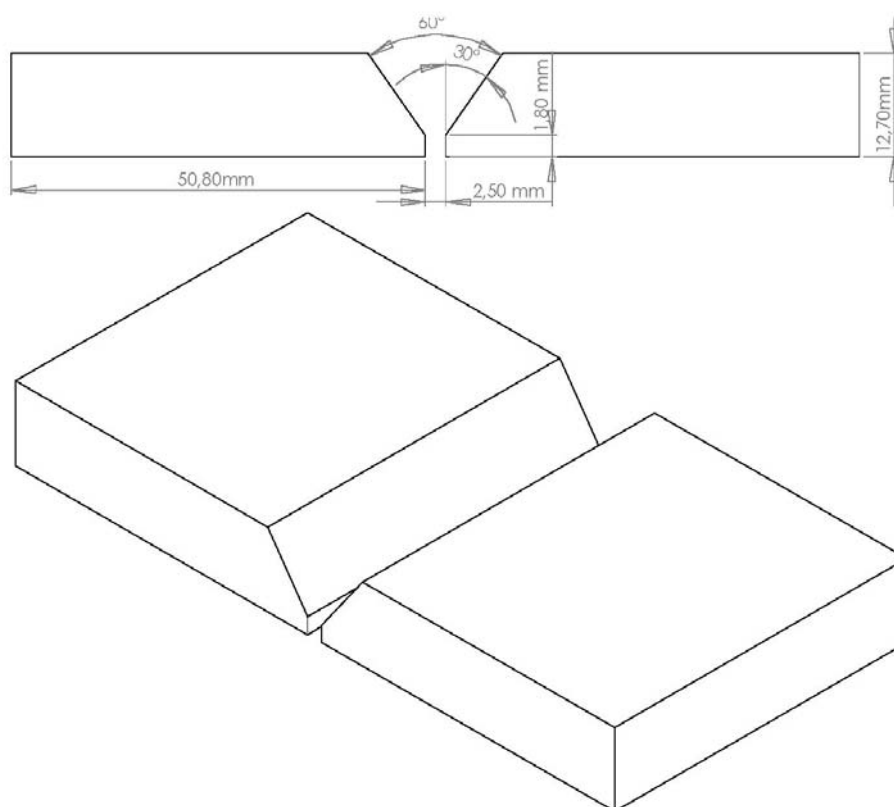


Figura 4.4 - Geometria da junta adotada.

O arame-eletrodo utilizado foi compatível com o material de base, sendo adotado o AWS A5.18 ER70S-6, de 1,2 mm de diâmetro. Os gases utilizados nos testes foram as misturas 75 % Ar e 25 % CO₂, 92 % Ar e 8 % CO₂ e o CO₂ puro. O

Eletrodo Revestido utilizado foi um dos mesmos aplicados na solda real, E 8010 G, (revestimento celulósico), de 4 mm de diâmetro.

A tocha de soldagem sofreu alterações para melhor acesso à raiz do chanfro, fazendo que o bico-de-contato ficasse proeminente em relação à extremidade do bocal, como mostra a Figura 4.5.



Figura 4.5 - Tocha adaptada.

Apesar de, à primeira vista, parecerem sem grande importância, os dispositivos de posicionamento da tocha, mostrados na Figura 4.6, foram de grande valia, no sentido de potencializar o funcionamento do robô. Ou seja, imperfeições na mesa sobre a qual era posicionado o corpo de prova e distorções do próprio poderiam comprometer os resultados, já que o desenvolvimento exigia a manutenção minuciosa da DBP ao longo de todo o cordão. A utilização apenas de recursos de programação do robô, para posicionamentos incrementais e TCP (*Tool Central Point*), é susceptível a essas imperfeições.

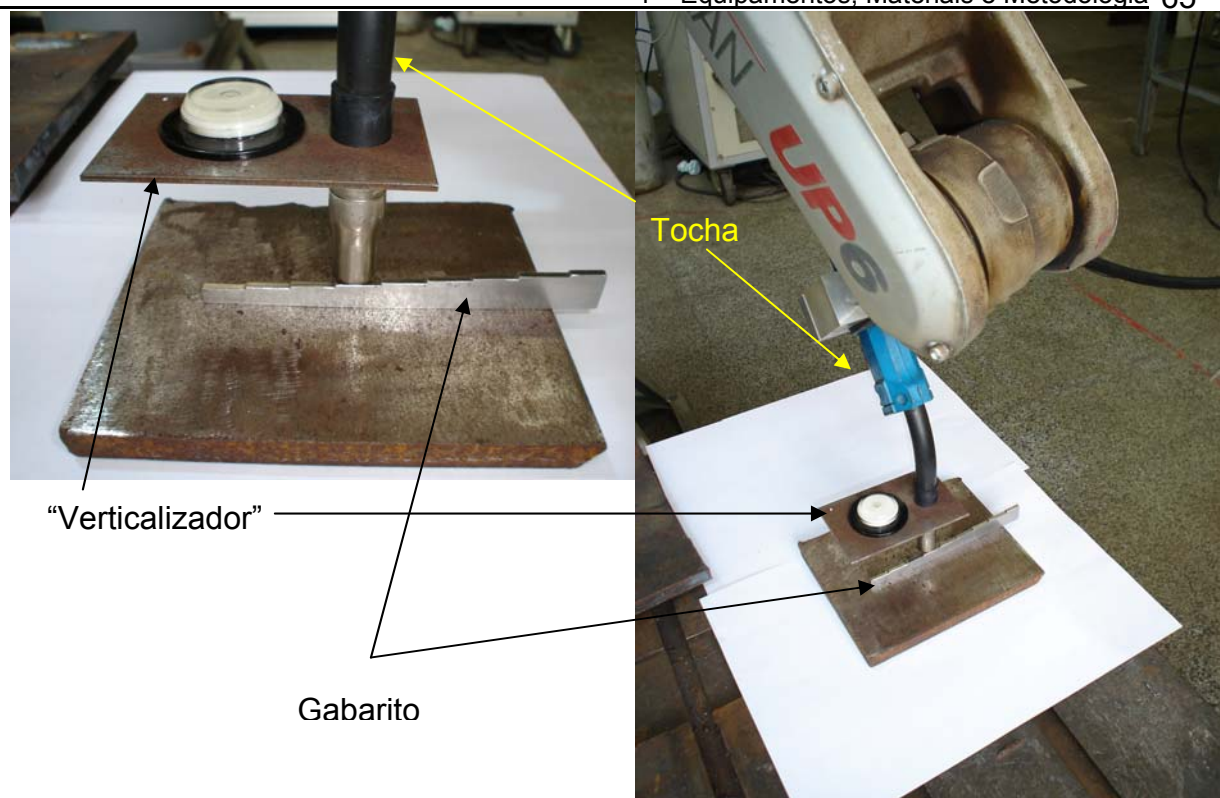


Figura 4.6 - Dispositivos para posicionamento da tocha: posicionador da tocha a 90° em relação á peça, chamado de “verticalizador”; gabarito para determinação da DBP.

4.4 - Ensaios

Foi realizado o planejamento dos ensaios de solda, partindo-se da obtenção de informações na soldagem semi-automática e robotizada com o MIG/MAG convencional em transferência metálica por curto-circuito até o desenvolvimento do CCC. Ao longo dos trabalhos, quando considerado adequado, os ensaios foram sendo adaptados, e são descritos na Tabela 4.2. Alguns valores adotados inicialmente advieram de informações anteriores do LABSOLDA, como V_s em 30 cm/min e V_a em 3 m/min.

As superfícies a serem soldadas eram limpas por esmerilhamento ou escovação. Nos ensaios em depósito sobre chapa, a temperatura das mesmas era monitorada entre as soldas, e se mantinha constante para o início de cada cordão de solda realizado, fazendo-se um rodízio entre vários corpos de prova. As vazões de gás eram medidas no bocal da tocha, com um fluxímetro tipo rotâmetro. Os detalhes sobre os resultados e a cronologia dos ensaios serão colocados no próximo capítulo.

Foi adotada uma programação para realização da calibração dos sistemas envolvidos. Foi feita uma calibração ao início dos ensaios e outra aproximadamente na metade dos trabalhos.

Tabela 4.2 - Síntese dos ensaios realizados.

Processo	Tipo	Objetivos
MIG/MAG convencional (ASME GMAW-S)	Semi-automático Preenchimento de chanfro Posição plana (ASME 1G)	Determinação da V_s e V_a Determinação da faixa de DBP
MIG/MAG convencional (ASME GMAW-S)	Robotizado Depósito sobre chapa Posição plana (ASME 1G)	Determinação do gás de proteção Variação da I_m conforme DBP Aspectos de penetração Comparação do nível de respingos
MIG/MAG convencional (ASME GMAW-S)	Simulação no Software PSpice	Verificação da taxa de variação da corrente, que teve leve aumento com redução da DBP (redução da R do circuito de soldagem)
MIG/MAG CCC	Semi-automático Depósito sobre chapa Posição plana (ASME 1G)	Determinação da forma de onda Determinação de parâmetros para o sistema de controle realimentado Comparação do nível de respingos
MIG/MAG CCC	Semi-automático Preenchimento de chanfro Posição plana (ASME 1G)	Regulagens necessárias Avaliação do resultado (corpo de prova) Validação das regulagens Comparação com ER, em termos de nível de respingos, qualidade visual do cordão, produtividade e facilidade de treinamento.
Eletrodo Revestido (ASME SMAW)	Manual Preenchimento de chanfro Posição plana (ASME 1G)	Comparações com MIG/MAG CCC

As dificuldades que acometeram a realização dos ensaios consistiram, principalmente, na falta de informações a respeito desse processo inovador

(MIG/MAG TMCCC), não havendo subsídios para determinar mais rapidamente quais variáveis e parâmetros investigar, suas influências no processo e metodologias para aplicação em diversas condições de soldagem. Em grande parte, a literatura sobre esse assunto específico trata de artigos técnicos dos fabricantes desses equipamentos, generalistas e, algumas vezes, contraditórios. Considera-se, no entanto, que os resultados obtidos forneceram as informações necessárias para o bom entendimento dos mecanismos atuantes.

A falta de ferramentas para avaliação dos resultados do CCC foi sentida no início, mas também foi sobrepujada pela otimização da bancada, hoje capaz de fornecer vários índices de avaliação do comportamento deste processo específico, e sua estabilidade.

A análise de aspectos da transferência metálica poderia ter sido mais profunda e refinada, caso houvesse a disponibilidade de uma câmera de alta velocidade, funcionando em sincronia com os sistemas de aquisição de sinais de soldagem.

5 - Resultados e Discussões

5.1 - CC convencional

Como ponto de partida, o comportamento do processo MIG/MAG convencional na realização do passe de raiz deveria ser determinado, a fim de se obter um embasamento adequado para o desenvolvimento do CCC.

5.1.1 - Definição do gás de proteção

Uma questão colocada no início do projeto dizia respeito ao gás de proteção a ser utilizado ao longo do desenvolvimento. Apesar de os sistemas MIG/MAG TMCCC terem, a princípio, a capacidade de possibilitar uma solda estável com CO₂ puro, a qualidade do resultado estaria correndo mais risco, quando da não perfeita regulagem do processo, ou quando de uma instabilidade momentânea. De fato, o MIG/MAG TMCCC tem no Japão um de seus primeiros e maiores centros desenvolvedores, exatamente pelo fato de que neste país o custo do CO₂ é consideravelmente menor que misturas com Argônio. Não sendo este o caso do Brasil, não se fixou imediatamente o CO₂ puro como gás de proteção para o trabalho. Testes com três diferentes opções, incluído o CO₂ puro, foram realizados, para fornecer subsídios para tomada de decisão quanto ao gás a ser adotado. As outras opções foram misturas de Argônio e CO₂ usuais no mercado: Ar + 25 % CO₂ e Ar + 8 % CO₂. Misturas especiais ou ternárias significariam aumento não necessário de custos.

Neste sentido, os três gases foram submetidos a ensaios, nos quais, mantidos constantes todos os outros parâmetros e variáveis de solda, foi alterada a DBP, em intervalos de 1 mm, numa faixa de 7 mm a 22 mm, tendo o robô um erro de posicionamento de $\pm 0,1$ mm. Foi verificado o comportamento quanto a variação da corrente média e desvio padrão de corrente de pico, um reflexo da estabilidade do processo. A Figura 5.1 mostra que o Ar + 25 % CO₂ foi o gás que apresentou menor variação da corrente média (dados na Tabela 5.1). Na Figura 5.2 observa-se que o desvio padrão do CO₂, como esperado, foi o maior, e que os valores para Ar + 25 % CO₂ e Ar + 8 % CO₂ ficaram bem próximos, além de que se mantiveram praticamente constantes ao longo das DBP's ensaiadas, para cada gás. Os valores foram fornecidos pelo software MIG/MAG.

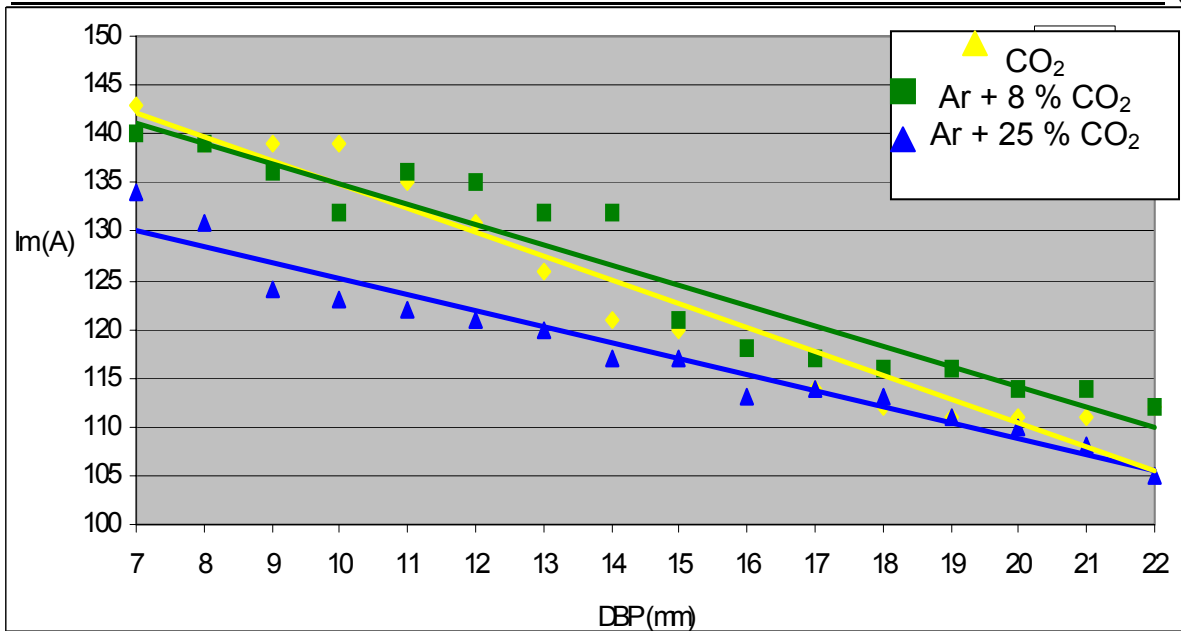


Figura 5.1 - Comportamento da corrente média (I_m) com a variação da distância bico de contato/peça (DBP), para os diferentes gases.

Tabela 5.1 - Regulagens nos ensaios da Figura 5.1. Diâmetro do arame de 1,2 mm.

Gás	Tensão (V)	Efeito indutivo $k_s = k_d$	Velocidade de arame (m/min)	Vazão de gás (l/min)
Ar + 25 % CO ₂	23	20	3	12
Ar + 8 % CO ₂	23	10	3	12
CO ₂	23	20	3	12

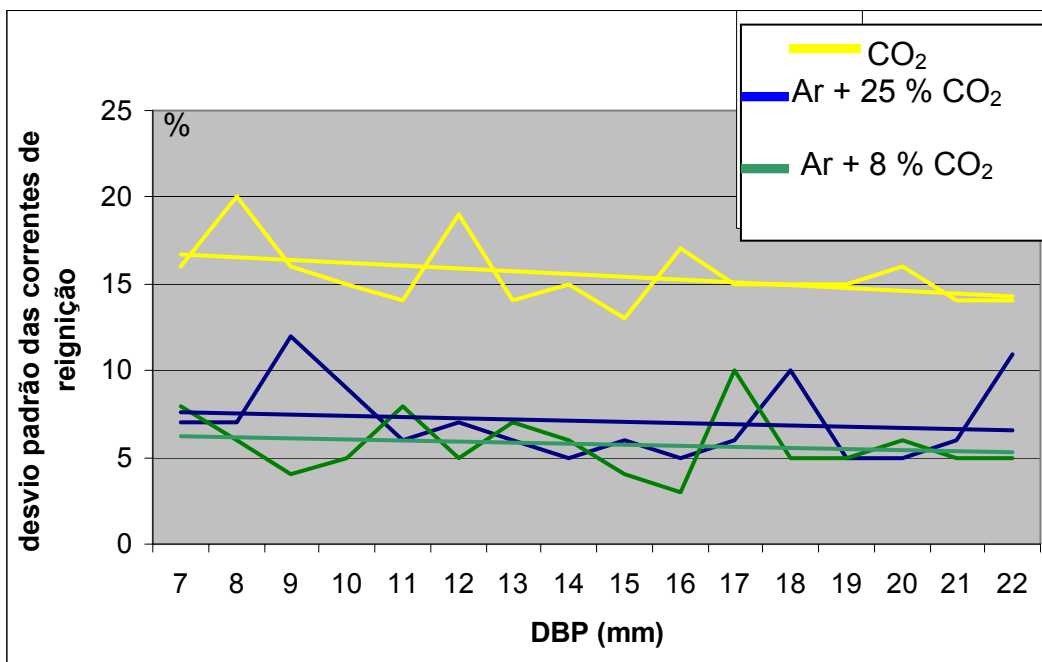


Figura 5.2 - Comportamento dos desvios padrões (A). Dados na Tabela 5.1

O Ar + 25 % CO₂ também apresentou maior regularidade quanto ao tempo de curto-circuito, ao longo de toda a faixa de DBP. Isto foi avaliado através do cálculo dos tempos médios de curto-circuito para cada DBP, e seus respectivos desvios padrões, como mostra a Tabela 5.2 abaixo.

Tabela 5.2 - Comportamento dos tempos de curto-circuito: tccm=tempo de curto-circuito médio para cada DBP; tccmt geral, para cada gás; dpm=desvio padrão médio geral para cada gás; dpm%=desvio padrão médio relativo ao tccm.

DBP (mm)	Ar + 25 % CO ₂			Ar + 8 % CO ₂			CO ₂		
	tccm (ms)	Desvio padrão (ms)	Desvio padrão (%)	tccm (ms)	Desvio padrão (ms)	Desvio Padrão (%)	tccm (ms)	Desvio padrão (ms)	Desvio Padrão (%)
7	3,56	0,38	10,69	4,96	0,57	11,38	2,95	1,01	34,26
8	3,67	0,37	10,06	4,90	0,84	17,24	3,10	1,16	37,62
9	3,50	0,34	9,58	4,96	0,64	12,93	2,99	0,83	27,65
10	3,66	0,32	8,71	4,98	0,46	9,27	3,05	0,76	25,00
11	3,72	0,35	9,53	5,32	0,63	11,93	3,16	0,77	24,28
12	3,72	0,36	9,67	4,97	5,16	103,77	2,99	1,11	36,96
13	3,67	0,37	10,08	5,02	0,64	12,72	2,96	0,72	24,21
14	3,78	0,33	8,64	4,97	0,48	9,71	3,16	0,82	25,97
15	3,81	0,39	10,30	4,74	0,34	7,17	2,94	0,75	25,37
16	3,50	0,40	11,30	4,74	0,35	7,30	3,16	0,77	24,48
17	3,84	0,36	9,49	5,30	0,68	12,83	3,22	0,86	26,58
18	3,83	0,53	13,92	5,02	0,47	9,41	3,10	0,89	28,79
19	3,89	0,38	9,68	4,91	0,57	11,52	3,05	0,87	28,53
20	3,56	0,37	10,38	4,80	0,51	10,71	2,99	0,87	28,95
21	3,76	0,34	8,93	4,85	0,49	10,08	2,99	0,72	24,18
22	3,95	0,52	13,26	5,00	1,58	31,54	3,10	0,77	24,81
tccmt	3,72			4,97			3,05		
dpm		0,37			0,57			0,82	
dpm%			9,93			11,39			27,00

Uma informação interessante originada da análise desses dados se refere ao fato de que os tempos médios de curto circuito se mantiveram praticamente constantes ao longo da faixa de DBP para todos os gases, como mostram a Figura 5.3 e a Tabela 5.2. Isto tende a corroborar a hipótese exposta na revisão bibliográfica, de que o volume da gota tem grande parcela na responsabilidade pelo tempo de seu destacamento, pois o volume médio se manteve praticamente constante para toda a faixa DBP, para cada gás, nas condições pesquisadas (Figura 5.4 e Tabela 5.3). Esse fato, por sua vez, muito provavelmente, advém do exposto

na revisão bibliográfica, de que, ao se aumentar a DBP, apesar de a corrente de arco, responsável pela formação da gota, cair, aumenta a contribuição do efeito Joule ao longo do *stick out*, numa forma de compensação.

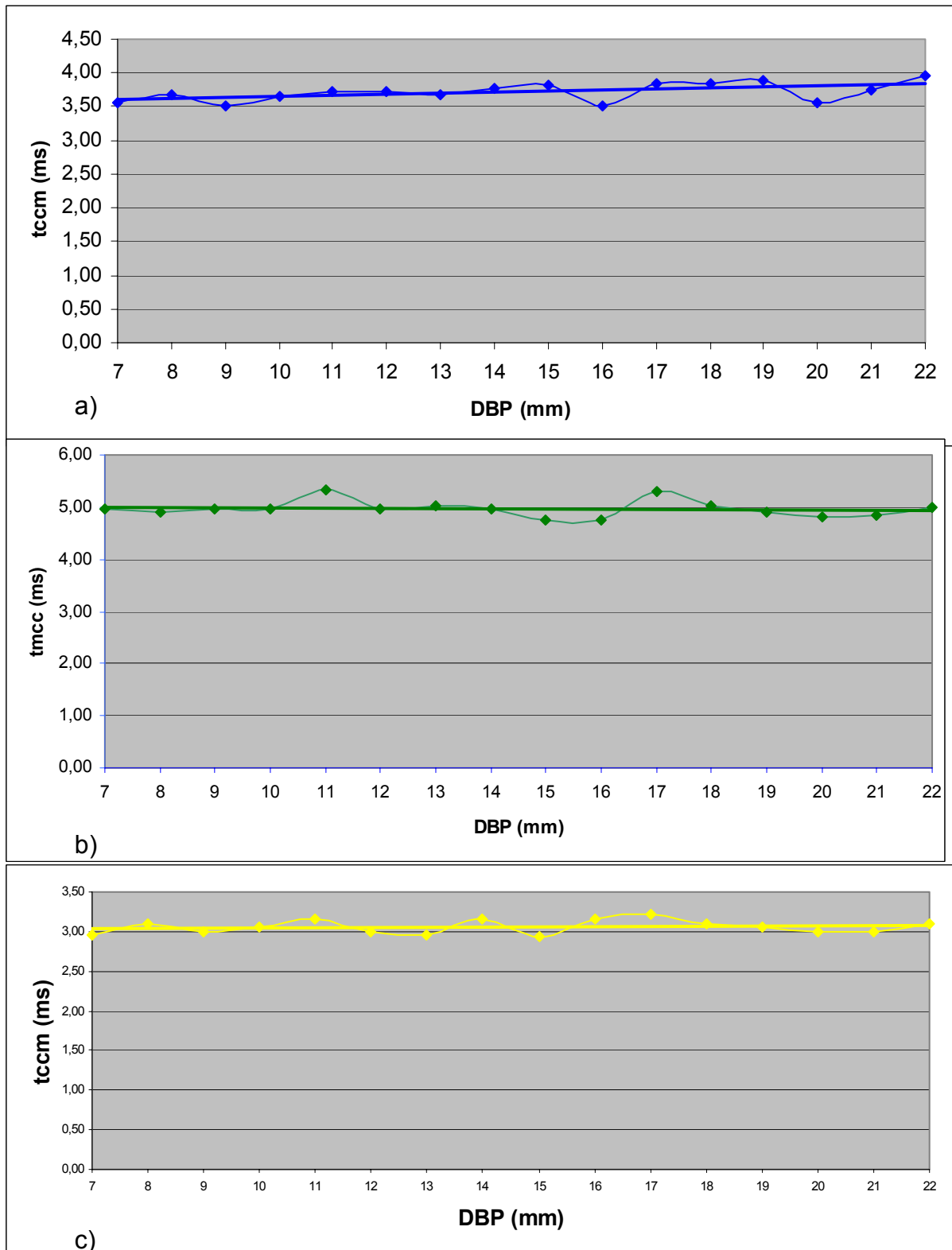


Figura 5.3 - Comportamento dos tccm ao longo das DBPs, para a) Ar + 25 % CO₂; b) Ar + 8 % CO₂; c) CO₂ (ATENÇÃO PARA AS DIFERENTES ESCALAS)

Tendo apresentado menos sensibilidade a variações na DBP, o Ar + 25 % CO₂ foi adotado como gás de proteção do desenvolvimento.

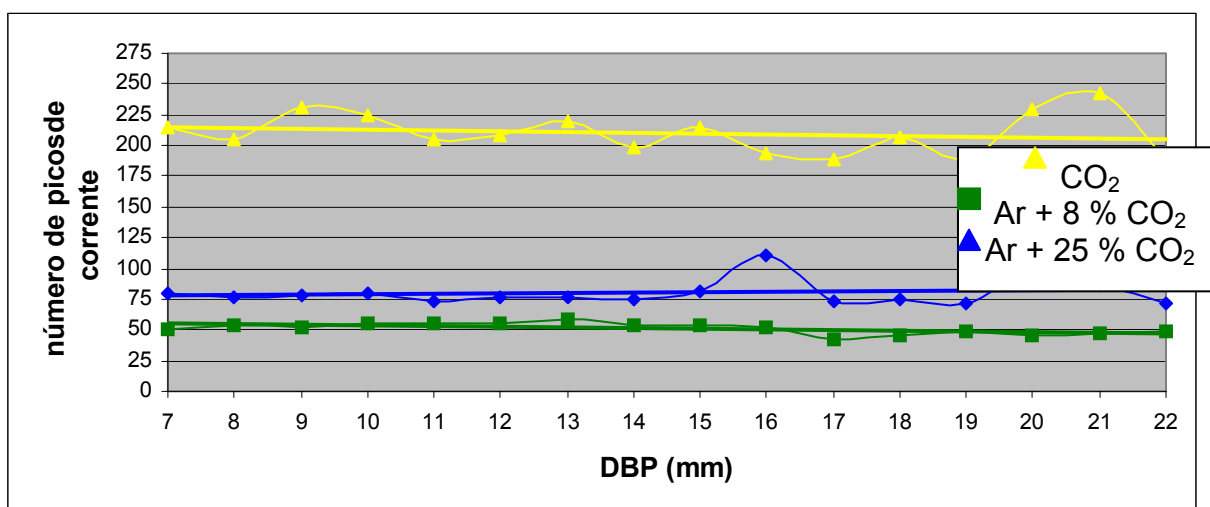


Figura 5.4 - Número de picos de corrente, em um período de aquisição de 3 s, refletindo, juntamente com a Va e o De, o volume médio de gotas, para cada gás, ao longo das DBPs. O número de picos de corrente pode ser avaliado de um gráfico como o da Figura 2.1, ou é fornecido diretamente por um *software* dedicado, como o MIG/MAG.

Tabela 5.3 - Volumes médios de gota.

DBP (mm)	Volumes médios de gota (mm ³)		
	Ar + 25 % CO ₂	Ar + 8 % CO ₂	CO ₂
7	2,12	3,32	0,79
8	2,23	3,20	0,83
9	2,17	3,26	0,73
10	2,15	3,03	0,76
11	2,29	3,08	0,83
12	2,20	3,08	0,82
13	2,20	2,88	0,77
14	2,26	3,20	0,86
15	2,09	3,20	0,79
16	1,54	3,20	0,88
17	2,32	3,94	0,90
18	2,26	3,77	0,82
19	2,39	3,46	0,90
20	1,77	3,77	0,74
21	1,95	3,53	0,70
22	2,39	3,46	0,90
Médias	2,15	3,34	0,81
desvio padrão	0,23 (10,49 %)	0,30 (8,90 %)	0,06 (7,82 %)

Caso seja feita a análise para DBPs mais usuais, por exemplo de 8 mm a 15 mm a tendência à manutenção do volume médio é ainda maior, como visto na Tabela 5.4:

Tabela 5.4 - Volumes médios de gota, DBP de 8 mm a 15 mm.

DBP (mm)	Volumes médios de gota (mm ³)		
	Ar + 25 % CO ₂	Ar + 8 % CO ₂	CO ₂
8	2,23	3,20	0,83
9	2,17	3,26	0,73
10	2,15	3,03	0,76
11	2,29	3,08	0,83
12	2,20	3,08	0,82
13	2,20	2,88	0,77
14	2,26	3,20	0,86
15	2,09	3,20	0,79
Médias	2,20	3,12	0,80
desvio padrão	0,06 (2,88 %)	0,12 (3,98 %)	0,04 (5,45 %)

5.1.2 - Refinamento de variáveis e forma de onda para o CCC e determinação de parâmetros de controle

Uma vez que já era possível manter o arco e produzir um cordão de solda contínuo (apesar de não otimizado) utilizando a versão prévia do CCC então disponível no LABSOLDA, era necessário, então, determinar valores de velocidade de soldagem e de velocidade de arame aplicáveis à junta em questão. Estes valores seriam adotados como padrão e transportados para o CCC. Para esta tarefa, foi seguida uma estratégia consolidada no LABSOLDA, a qual vem obtendo sucesso sempre que empregada. Os sistemas automáticos não têm a capacidade de discernimento, avaliação e adaptação que um bom soldador tem, o que se torna mais acentuado numa solda como um passe de raiz, onde os requisitos de qualidade exigem um grande controle da poça metálica e da fusão das peças.

Sendo assim foram realizadas soldas para treinamento e definição de velocidade de soldagem e velocidade de arame dedicadas à junta chanfrada do corpo de prova descrito no capítulo anterior. Quando o procedimento estava definido e o soldador apto, a operação foi cronometrada e, havendo um movimento de tecimento, sua frequência foi determinada. A geometria da solda resultante foi analisada e, considerando-se o movimento de tecimento, se definiu a faixa de DBP para a qual o CCC seria, a princípio, direcionado. A Figura 5.5 mostra os valores

obtidos nesta etapa. Como não se têm uma visualização detalhada da DBP, se admitiu que o arame encostasse na poça a 1/3 da altura média do nariz do chanfro, ou seja, 0,60 mm. O bico de contato, para melhor acesso, ficava proeminente em relação ao bocal, e este se manteve apoiado nas bordas do chanfro. Então, levando em conta isto e a inclinação da tocha (puxando), considerou-se a distância máxima de 10 mm. Para o menor valor de DBP, foi admitido 7 mm.

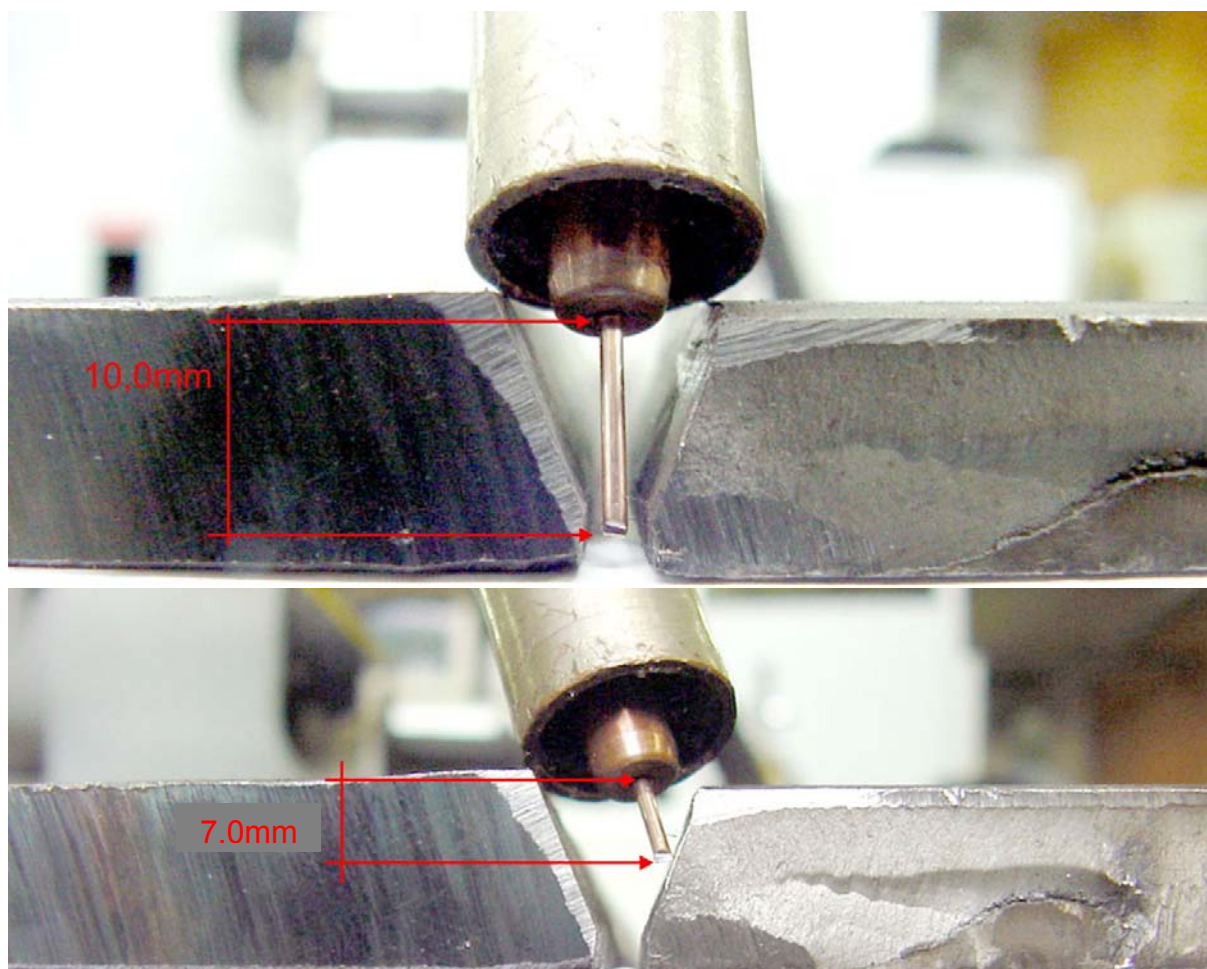


Figura 5.5 - Variação da DBP assumida, durante o passe de raiz da junta.

Para averiguação da influência no processo do movimento de tecimento realizado pelo soldador, foi realizado um ensaio de depósito sobre chapa robotizado. Naturalmente, as conclusões podem ser estendidas a qualquer solda em MIG/MAG convencional onde haja variação na DBP. Esse ensaio simulou, em forma de rampas, a situação da solda real descrita anteriormente. Este teste foi realizado com o robô, devido à possibilidade de sincronizá-lo com o sistema de aquisição de dados e sua capacidade de repetição. Dessa maneira, pôde-se visualizar a situação do processo, traduzida pela corrente média, a cada posição em que a tocha se

encontrava em relação à peça (Figura 5.6). O esperado foi verificado, havendo variação da corrente média (devido à sobreposição dos efeitos de alteração na DBP e aumento/redução momentânea da freqüência de transferência metálica).

Uma averiguação interessante foi a de que o pico e o vale no oscilograma de corrente média não acontecem nas extremidades da amplitude do movimento. Esse fato não foi profundamente analisado, mas, preliminarmente, pode-se afirmar que é decorrido a um atraso imposto pelo método de comando.

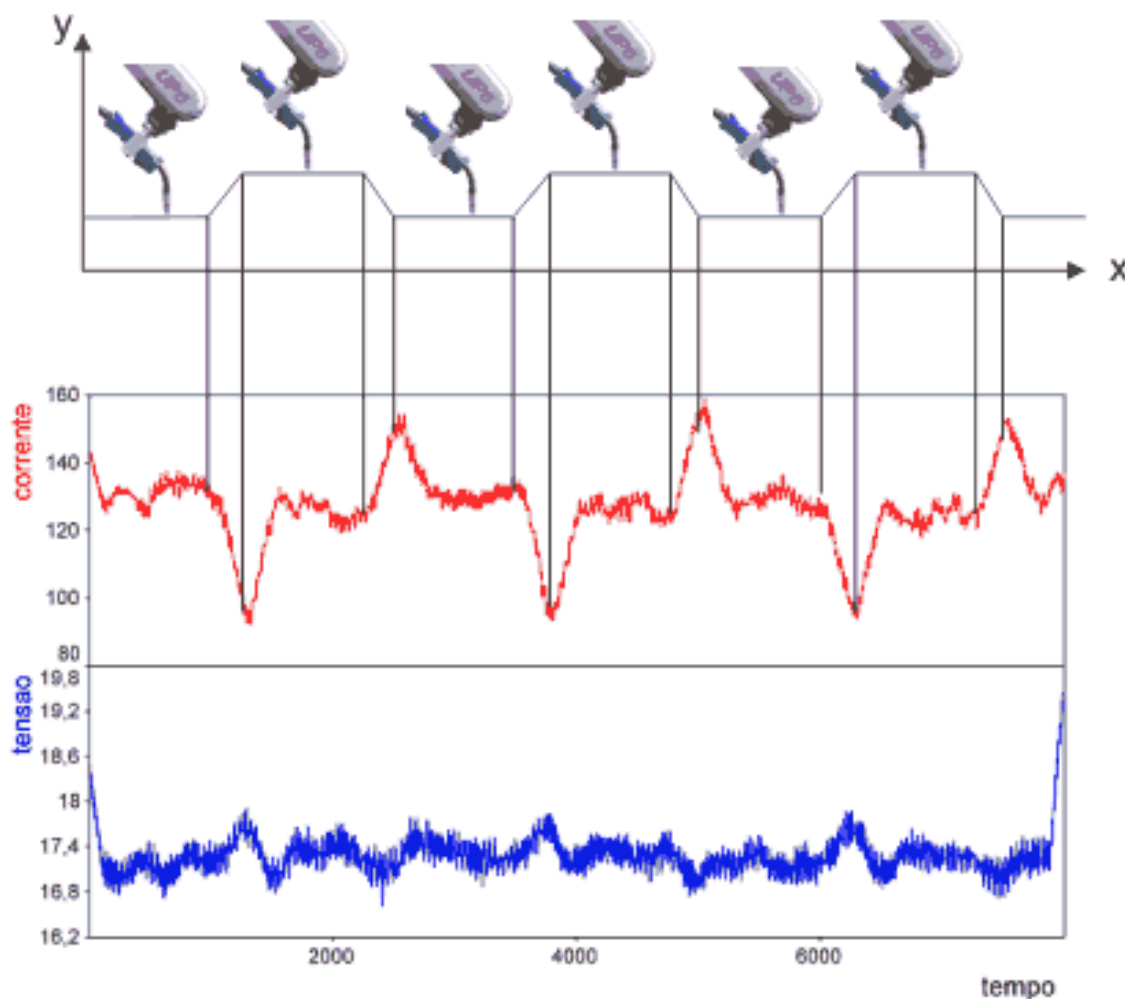


Figura 5.6 - Comportamento da corrente e tensão médias ao longo das alterações na DBP, em ensaio robotizado sincronizado com aquisição de dados de soldagem.

O gráfico é o sinal filtrado da corrente e tensão instantâneas, para melhor visualização da variação dos valores médios.

Este resultado levou a se analisar os corpos de prova do primeiro ensaio (para determinação do gás) quanto à penetração. Naqueles ensaios também houve alteração na corrente média (naquele caso, somente decorrente da alteração da DBP). Assim, pode-se presumir as heterogeneidades que a variação da DBP ocasiona na solda (Figura 5.7). Somado ao fato de que alterações na corrente média provocam alterações na temperatura e, conseqüentemente, na fluidez do material, esse fato se torna um grave complicador para soldas críticas, como o passe de raiz de dutos.

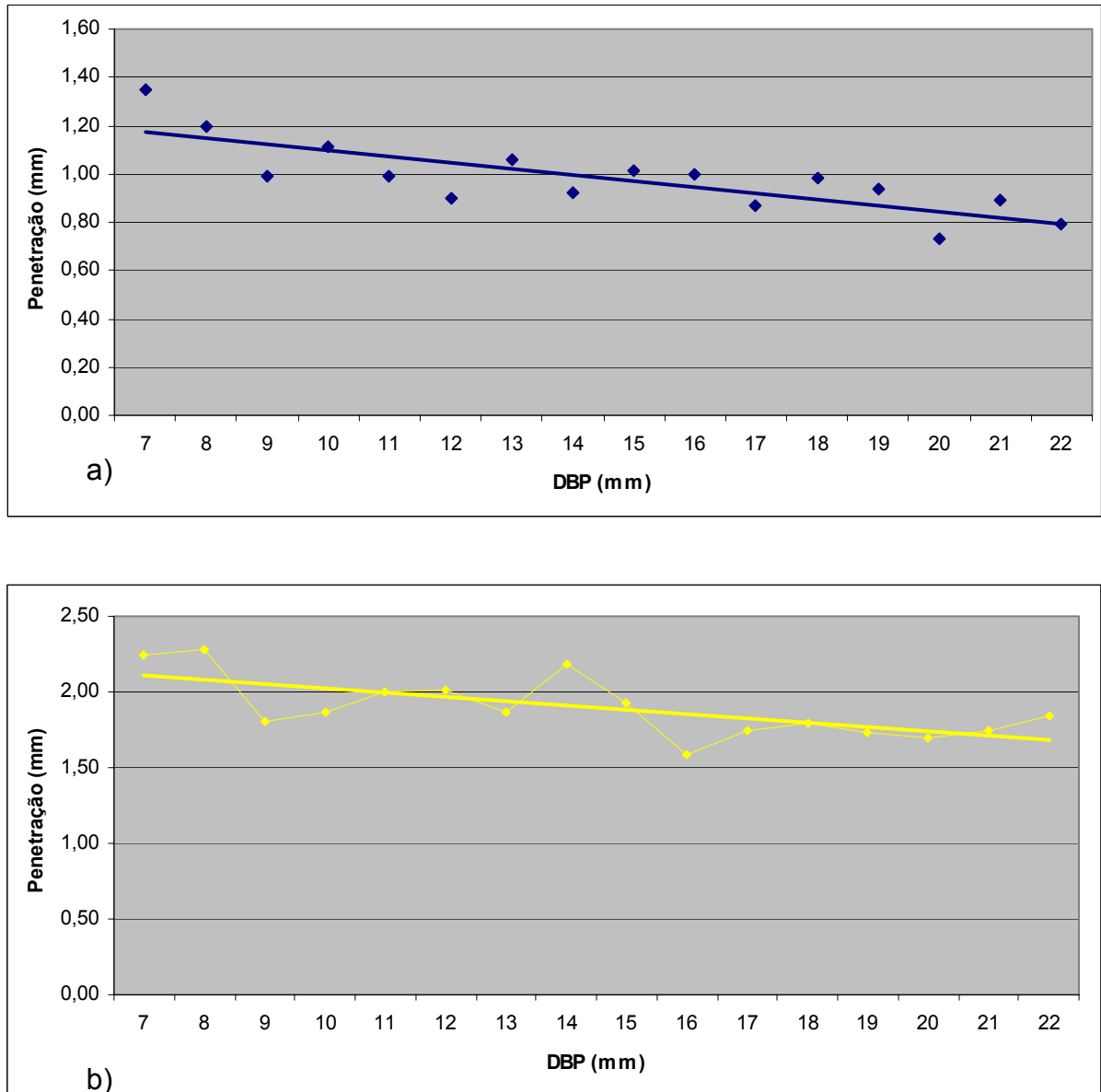


Figura 5.7 - Efeito da variação da Im como decorrência de variação na DBP, na penetração. a) C25; b) CO₂

5.1.3 - Aspectos da penetração do processo MIG/MAG em transferência metálica por curto-circuito convencional

Os resultados anteriores, juntamente aos objetivos almejados do CCC, motivaram pesquisas relativas ao mecanismo de penetração na transferência metálica por curto-circuito, sendo a literatura pobre neste assunto.

Eles mostraram que houve alteração na penetração, mesmo ao se manter constante a frequência de transferência, por consequência o volume da gota, para cada gás, o que leva a descartar, para a transferência metálica por curto-circuito, o mecanismo de penetração encontrado na transferência por escoamento goticular axial, descrito nas referências bibliográficas.

Planejou-se, então, verificar as influências isoladas da corrente no momento de reabertura de arco (corrente de pico, Figura 2.1) e da corrente de arco (Figura 2.1) sobre a penetração, já que eram esses os valores que se alteravam com maior intensidade, quando se alterava a DBP, e também por causa da constante afirmação na literatura de que esta é a variável que determina a penetração. O parâmetro de soldagem indutância, cujo valor pode ser regulado continuamente na INVERSAL 600, foi de fundamental importância nesta etapa, possibilitando a regulação indireta da corrente de pico, mantendo-se a corrente de arco constante, e da corrente de arco, mantendo-se a corrente de pico constante, sempre mantendo o mesmo volume médio de gota.

Do gráfico a seguir (Figura 5.8), conclui-se que, na transferência metálica por curto-circuito, a corrente de arco é responsável pela penetração. Considerando-se o material pesquisado, o autor dá suporte a teoria do vortex, que aumenta a convecção e permite maior eficiência na transferência de calor para o material de base, devido ao incremento das forças magnéticas, causado pelo aumento da corrente. Filmagem em alta velocidade permitiria melhor análise.

Tabela 5.5 - Dados dos ensaios da Figura 5.8

Cordão	Va (m/min)	Uref (V)	Vs (cm/min)	I _{pm} (A)	I _{am} (A)	Gás de proteção / vazão (l/min)
A	3	23	30	321	76	C25 / 13
B	3	21	30	366	61	C25 / 13
C	3	21	30	328	61	C25 / 13

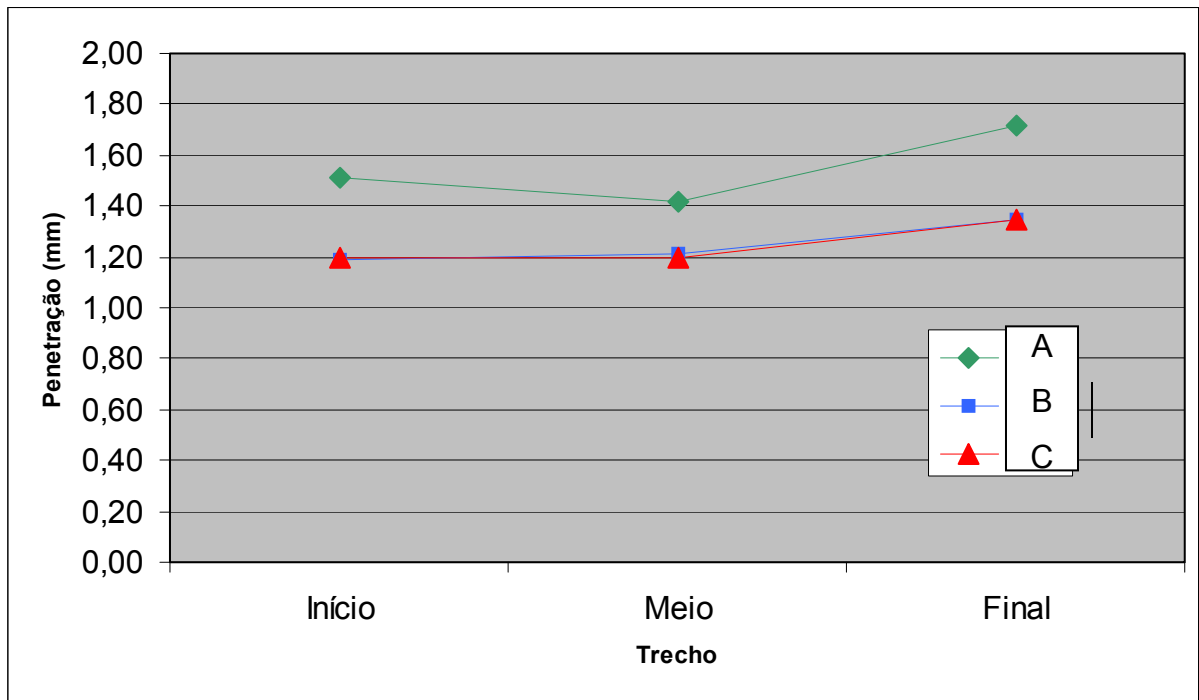


Figura 5.8 - Efeito da corrente de arco na penetração, para o MIG/MAG convencional, em transferência metálica por curto-circuito em diferentes trechos de cada cordão. Dados correspondentes na Tabela 5.5.

5.2 - CCC

De posse dos resultados acima descritos e das informações angariadas da literatura, partiu-se para os ensaios aplicando o CCC, no intuito de se gerar conhecimento sobre o processo e estipular um procedimento para a realização do passe de raiz em questão.

5.2.1 - Forma de onda

Como descrito na revisão bibliográfica, existem várias concepções de forma de onda no mercado, ou em desenvolvimento, assim como estratégias de controle, buscando, de uma maneira geral, maior estabilidade na transferência por curto-circuito, principalmente em misturas com CO₂, ou CO₂ puro. Em seus trabalhos no LABSOLDA, Baixo e Raul, testaram algumas formas de onda, e adotaram a da Figura 2.29, a qual chamaram de “forma de onda em três níveis de corrente”, impondo corrente em todas as fases, para o prosseguimento de seus estudos, sendo esta a que foi primeiramente utilizada no presente trabalho.

Devido à flexibilidade oferecida pelos equipamentos, e de acordo com informações da literatura, uma nova forma de onda foi gerada e comparada com a anterior, obtendo melhores resultados, para as mesmas condições (neste caso, avaliados apenas visualmente). A nova forma de onda está na Figura 5.9, onde se observa a adição de uma nova fase, a fase 6, de uma rampa entre a fase 5 e a 6 e outra rampa entre a fase 6 e a 1.

As estratégias de controle continuaram a ser aquelas determinadas por Raul, em sua Tese [30]. Ou seja, para determinação da iminência de reabertura do arco, o sistema é realimentado continuamente com o sinal de resistência elétrica do circuito de soldagem durante a fase 3, o qual é comparado com um valor de referência, o chamado K_{rab} . Também na fase 3, o sinal de tensão é adquirido, refletindo a DBP atual. Esta informação é utilizada pelo sistema para determinação do tempo da fase 5, que propiciará a energia necessária para a manutenção da regularidade da transferência.

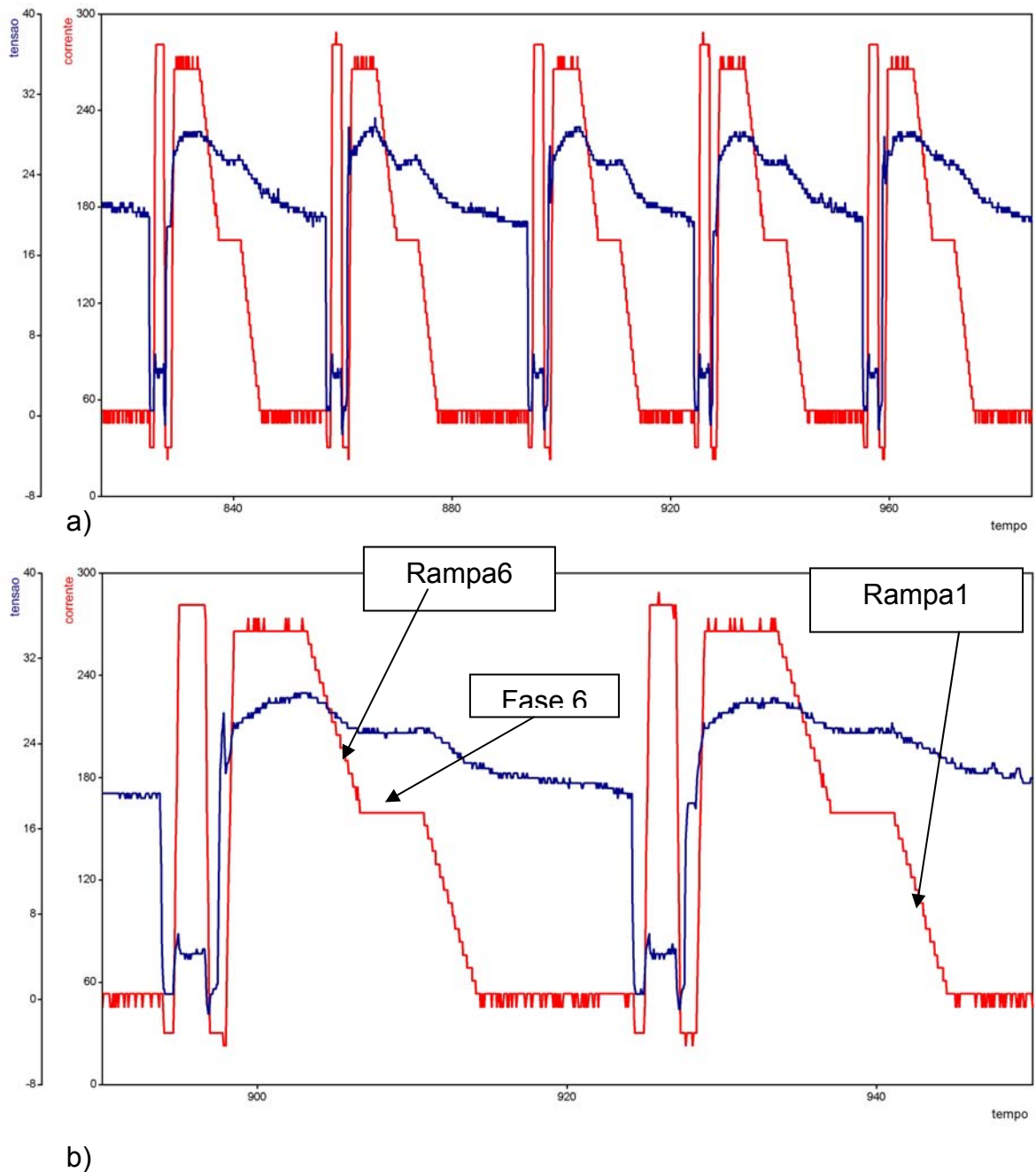


Figura 5.9 - Forma de onda desenvolvida para o CCC, com as fases adicionais (rampa1, rampa6 e fase 6). a) regularidade da transferência. b) detalhe da forma de onda (relativo a a)).

Levando em consideração as informações sobre o comportamento da resistência levantadas na literatura, e os próprios resultados do CCC, verificou-se a adequação deste método de detecção da iminência de reabertura do arco e do uso do sinal de tensão para medição da DBP. A Figura 5.10 mostra o comportamento da resistência e tensão de vários períodos de curto-circuito (durante a fase 3), em ensaio com CCC, e o momento de leitura da resistência R_i e da tensão U_i .

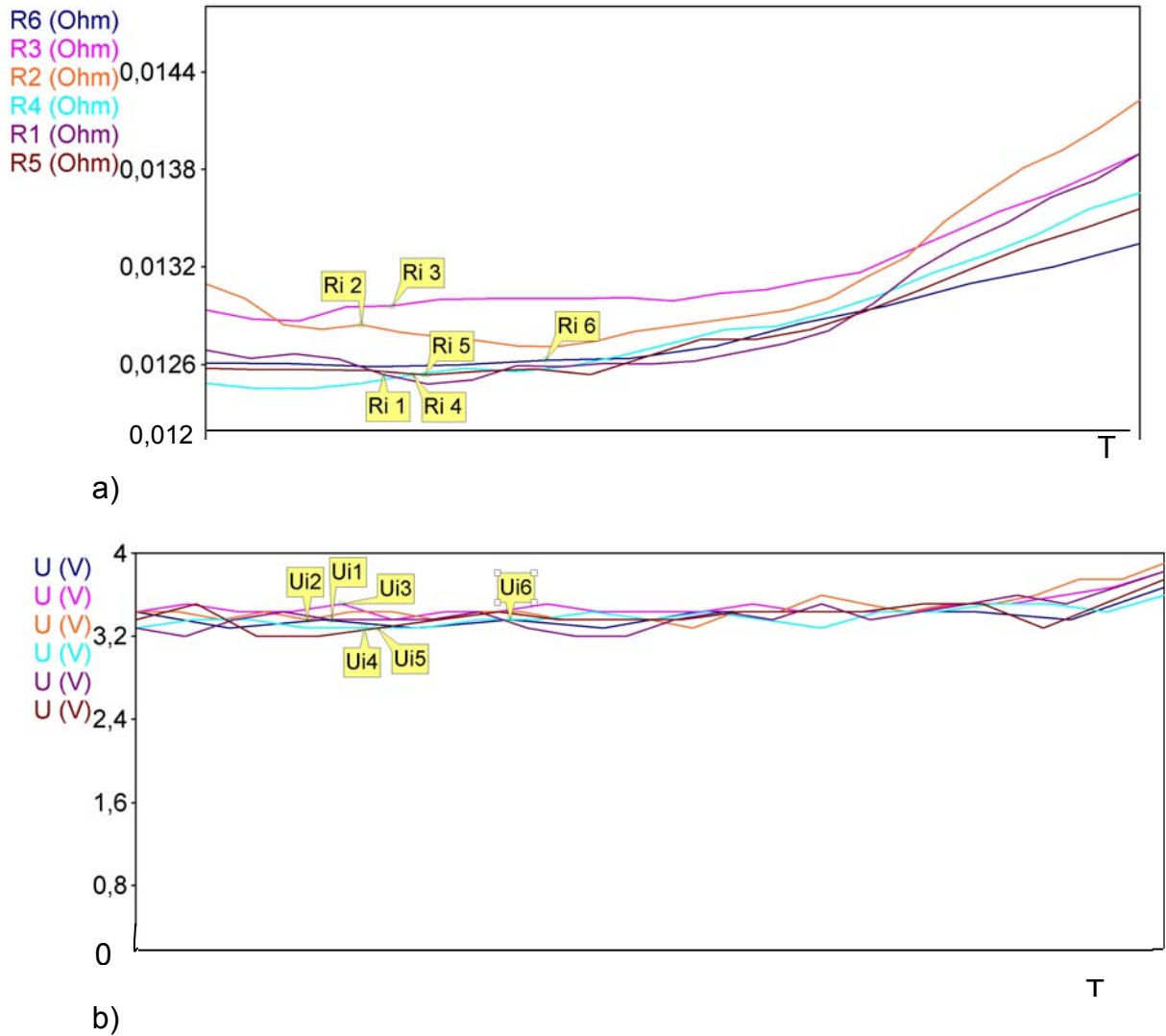


Figura 5.10 - Comportamento da a) resistência e b) tensão do circuito de soldagem, na fase 3, e o momento de leitura de R_i e U_i , para vários curtos-circuitos (de 1 a 6) de um mesmo cordão, em pontos aleatórios do mesmo. Faz-se notar o momento da leitura dos sinais, em patamar estável. A escala T dos eixos y representa, ilustrativamente, o tempo.

A partir daí se necessitava aperfeiçoar a forma de onda quanto aos valores de corrente de todas as fases e tempos das fases 2, 4, 6 e rampa 6 e rampa 1, pois o tempo da fase 1 depende da dinâmica da transferência, o tempo da fase 3 é controlado pelo sistema, assim como o é o tempo da fase 5.

Com esse intuito, o programa de controle foi aperfeiçoado. Foram criadas ferramentas incorporadas a ele, que geram diversos arquivos (pacote de arquivos DIGI) contendo dados oscilográficos e estatísticos sobre a solda realizada. Os testes

se iniciaram com os valores segundo Baixo, que foram obtidos com CO₂ puro, e os valores modificados conforme os resultados observados nestas ferramentas.

A Tabela 5.6 mostra esses arquivos e sua função e as Figuras de 5.11 a 5.17 mostram os resultados obtidos de cada um deles.

Tabela 5.6 - Pacote de arquivos de análise de dados, desenvolvido e incorporado ao sistema, para avaliação do CCC.

Arquivo gerado no micro de controle	Função
DIGI2000.0	Onda completa de I, U e R da solda, indicando os pontos de transição entre fases
DIGI200R	Leitura de todos os valores de I, U e R no momento de leitura da DBP (Ui) e da Ri (a ser explicado em seguida)
DIGI20TA	Histograma de tempos de arco aberto
DIGI20TC	Histograma de tempos de curto-circuito e total de curtos-circuitos ocorridos
DIGI20TP	Histograma de períodos completos de transferência e tempo total de aquisição
DIGI2TF1	Histograma de tempos da fase 1
DIGI2TF3	Histograma de tempos da fase 3
DIGI2TF4	Histograma de tempos de abertura de arco na fase 4 e quantidade de aberturas ocorridas nesta fase

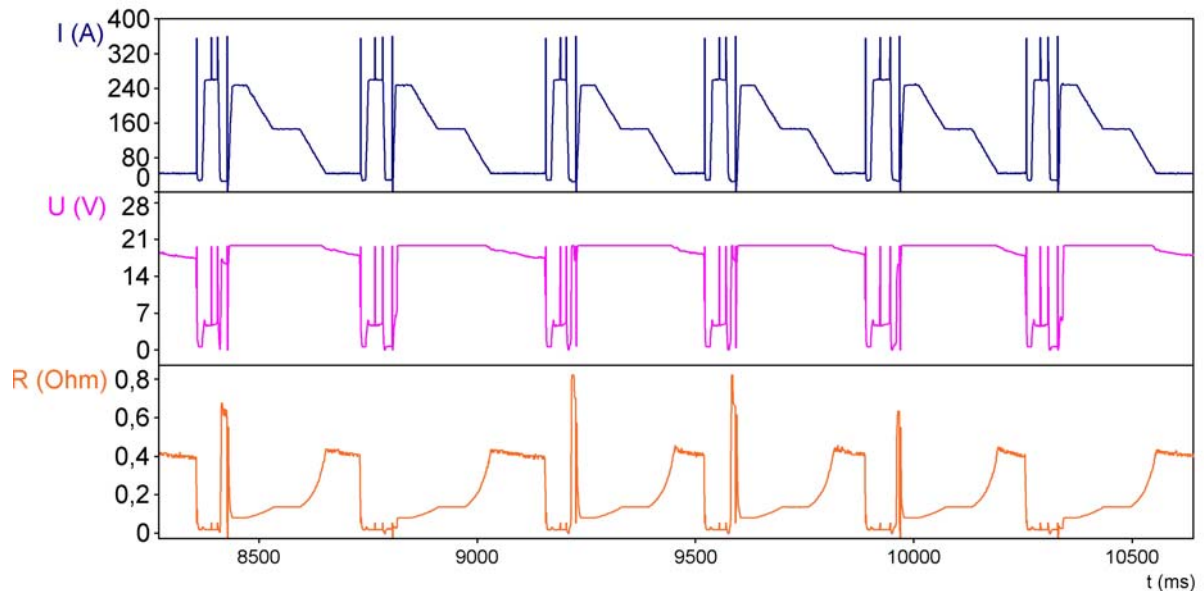


Figura 5.11 - Arquivo DIGI2000.0

Na Figura 5.11, pode-se observar a onda completa, fornecida pelo Arquivo DIGI2000.0. Os picos nos valores das três ondas correspondem a sinais injetados nos dados, para identificar a transição de fases e as leituras na fase 3. Como observado o sistema tem limitada sua leitura de tensão, o que não prejudica o seu funcionamento. Por enquanto, aquisições completas de tensão devem, quando necessário, ser feitas no programa MIG/MAG.

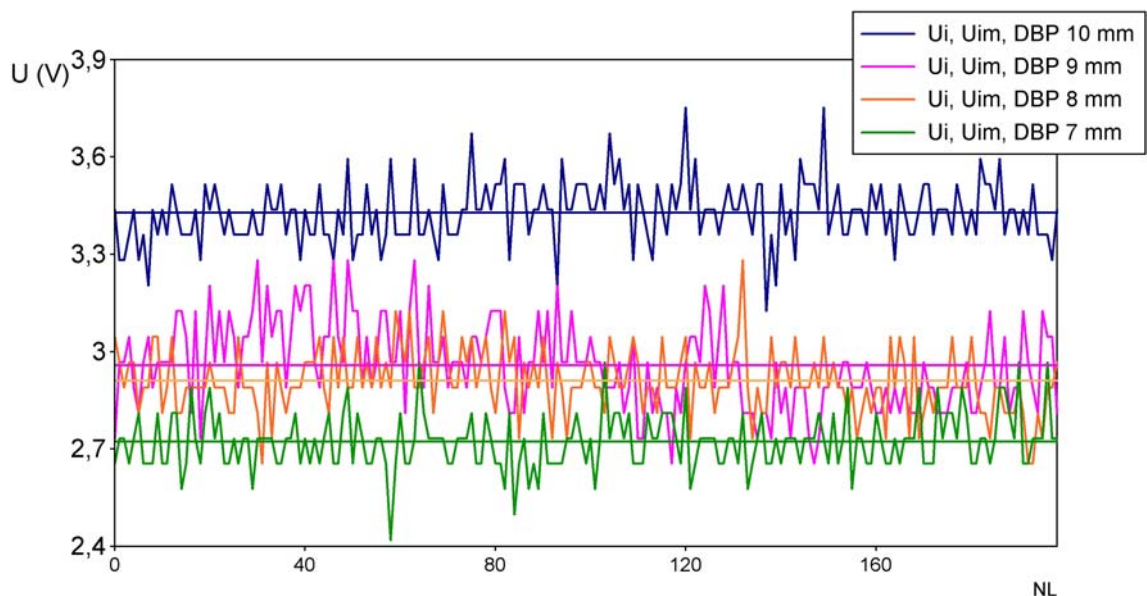


Figura 5.12 - Arquivo DIGI200R.0

Para melhor visualizar a função do arquivo DIGI200R.0 a Figura 5.12 mostra os dados para a faixa de DBPs de 7 mm a 10 mm e passo de 1 mm, explicitando, principalmente, a função de Ui de informar a DBP.

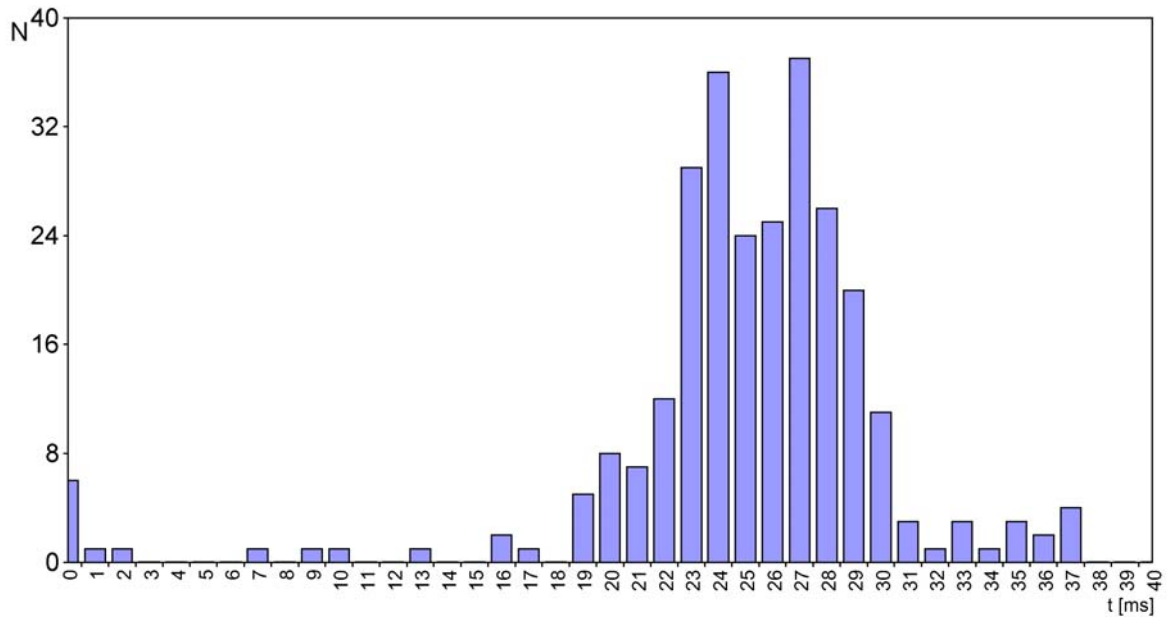


Figura 5.13 - Arquivo DIGI20TA.0, relativo ao tempo de arco. Reflete a regularidade do tempo de arco. N é o numero de ocorrências dentro do período monitorado.

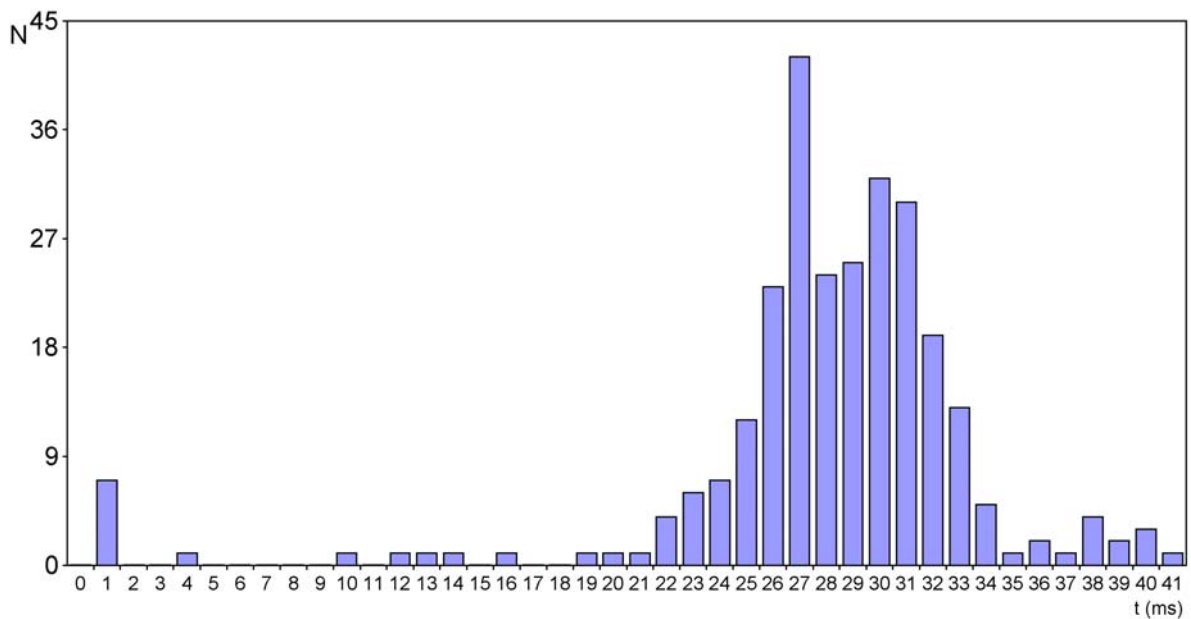


Figura 5.14 - Arquivo DIGI20TP.0, relativo ao período. Reflete a regularidade do período da forma de onda. N é o numero de ocorrências dentro do período aquisitado.

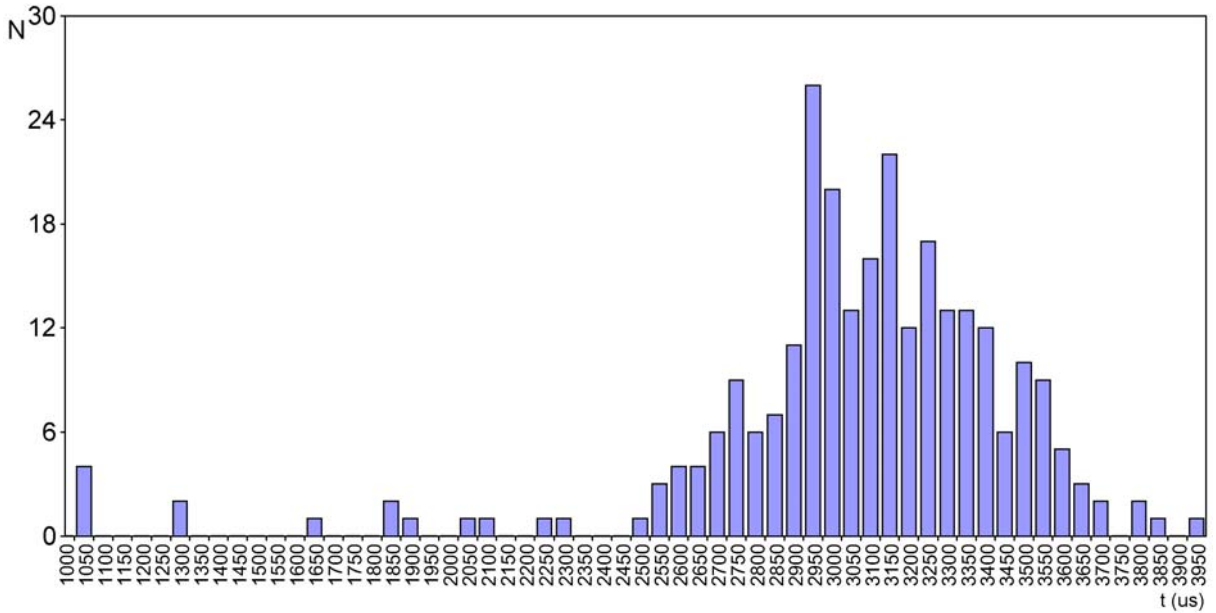


Figura 5.15 - Arquivo DIGI20TC.0. Reflete a regularidade do tempo de curto-circuito. N é o numero de ocorrências dentro do período aquisitado.

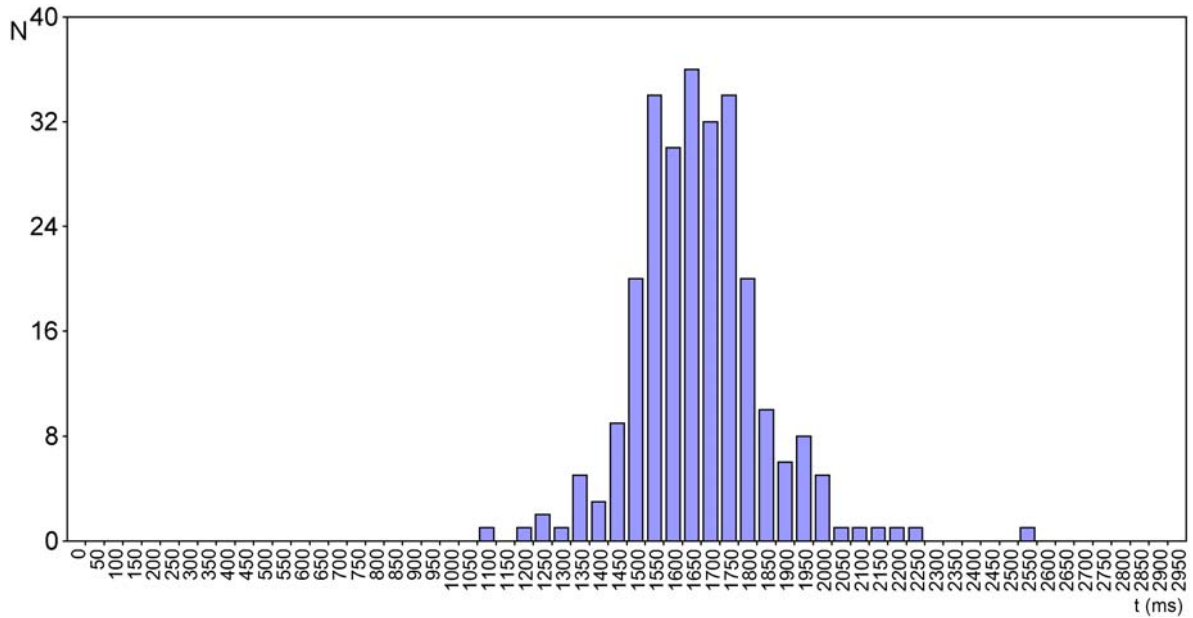


Figura 5.16 - Arquivo DIGI2TF3.0. N é o numero de ocorrências dentro do período aquisitado.

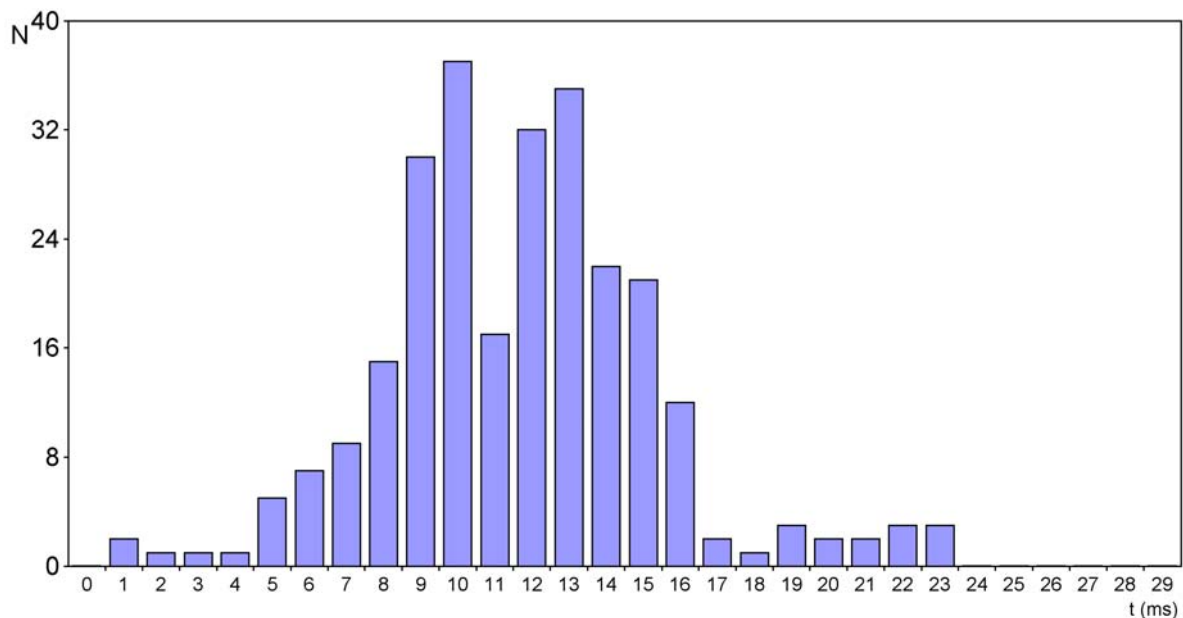


Figura 5.17 - Arquivo DIGI2TF1.0. Reflete a regularidade do tempo da fase 1. N é o numero de ocorrências dentro do período aquisitado .

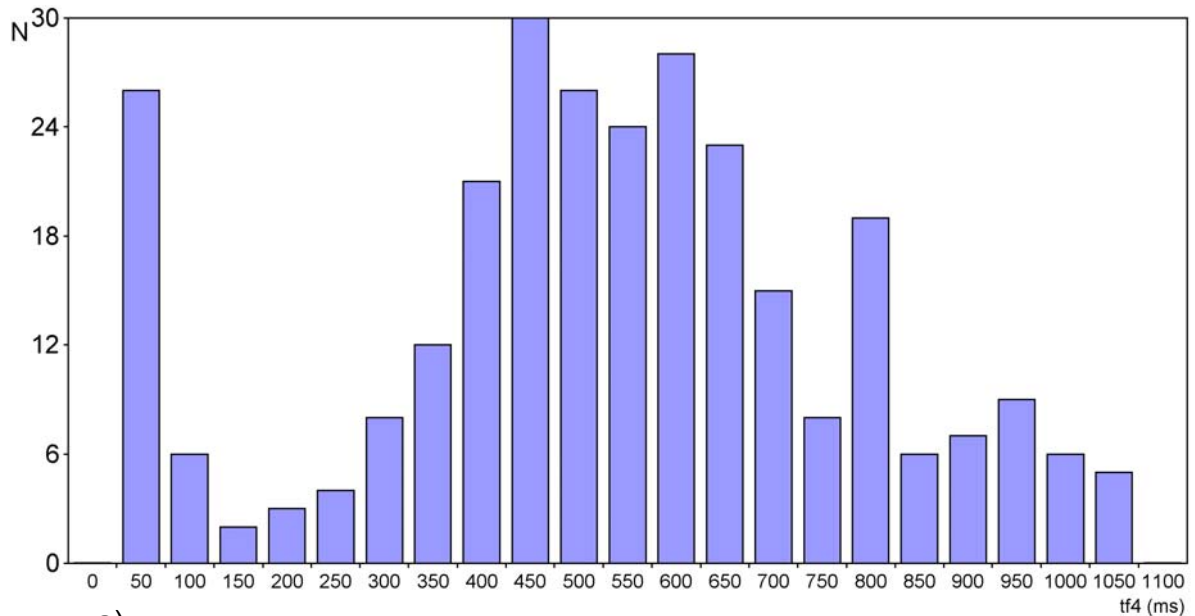
As figuras apresentam histogramas, os quais ajudam na avaliação da estabilidade do processo, fornecendo informações acerca da regularidade/repetibilidade, assim como o valor chamado modal de cada tempo, que é o que ocorre com mais freqüência. O arquivo DIGI20TP.0 também fornece o tempo total de aquisição o qual é utilizado, juntamente com o total de curtos-circuitos ocorridos, fornecido pelo arquivo DIGI20TC.0, para o cálculo do volume e diâmetro médios de gota. Para esse cálculo, foi escrito um programa simples, que também tem que ser alimentado com o raio do arame-eletrodo e a velocidade de arame, como mostra a Tabela 5.7 abaixo

Tabela 5.7 - Cálculo do Volume médio de gota.

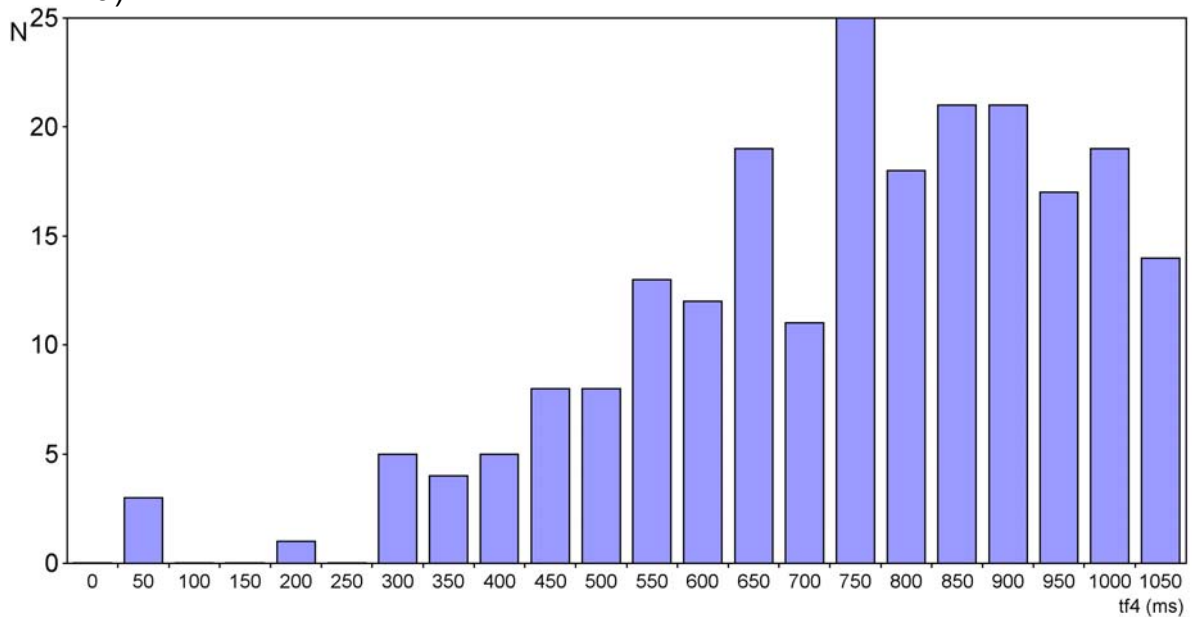
Raio do Arame (mm)	0,6
Velocidade do Arame (m/min)	3
Tempo de aquisição (ms)	3000
Numero de C.C.	100
Diâmetro Médio da Gota	1,4797
Volume Médio da Gota	1,6965

A Figura 5.18 revela o histograma gerado do arquivo DIGI2TF4, revelando o total de reaberturas de arco que ocorrem nesta fase e a forma como elas estão distribuídas ao longo da mesma. No exemplo mostrado na letra a), uma boa

porcentagem das reaberturas ocorreu na fase 4 (corrente baixa), como é o ideal. Mas o fato de que grande parte ficou concentrada nos primeiros 250 μ s desta fase não é desejável, pois devido à dinâmica da máquina, que apesar de ser rápida, impõe na realidade uma rampa de redução de corrente, essas reaberturas acabam ocorrendo ainda em correntes altas. A situação b) é mais favorável.



a)



b)

Figura 5.18 - Arquivo DIGI2TF4.0. N é o número de reinições ocorridas na fase 4, propriamente, dentro do período aquisitado. a) muitas reaberturas de arco antes de 250 μ s, ou seja, ainda em corrente alta e b) maioria das reaberturas de arco em correntes baixas.

O gráfico de $U_x I$ também pode ser utilizado para avaliação da estabilidade, como mostra a Figura 5.19, onde estão dois resultados diferentes.

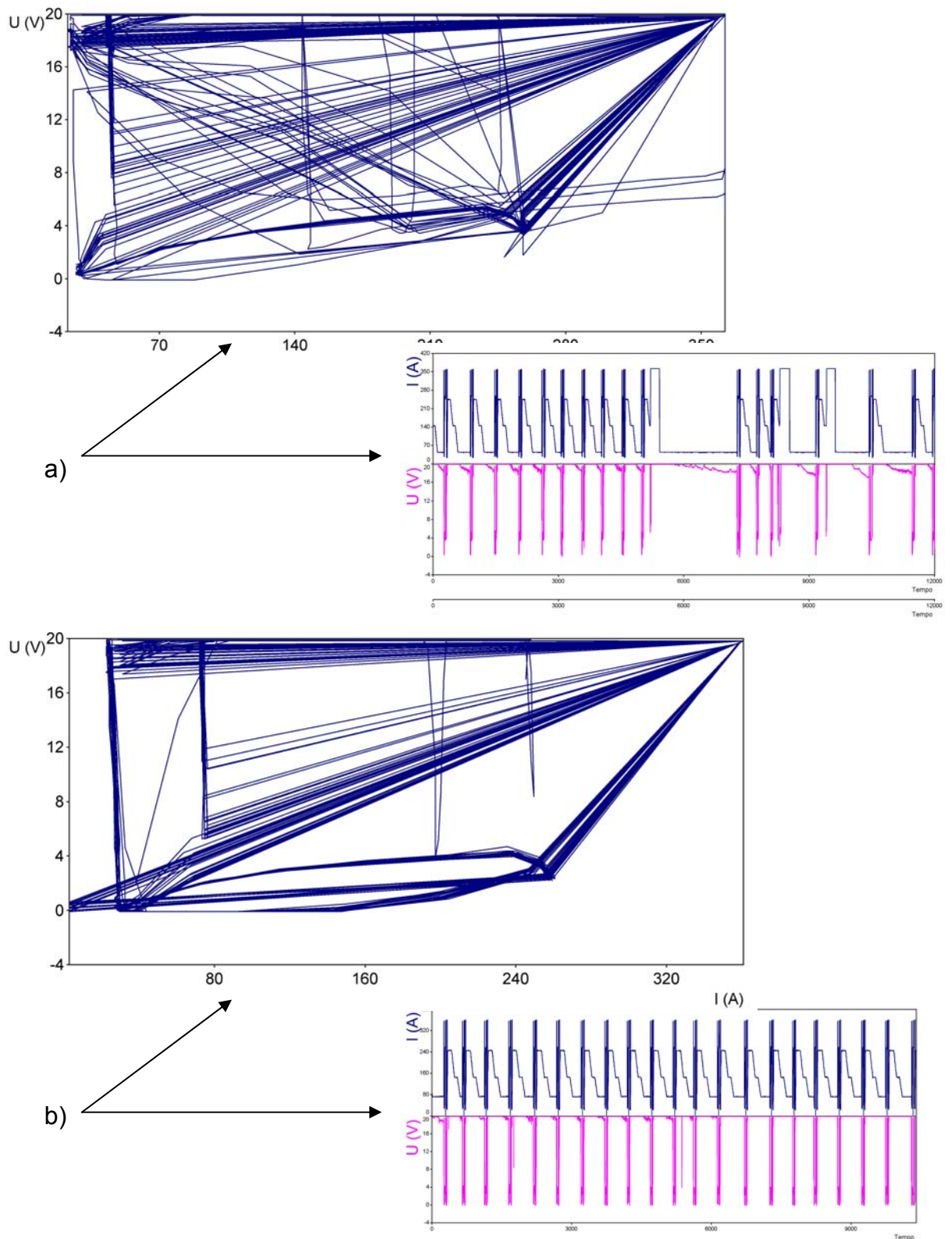


Figura 5.19 - Gráficos de U por I , proporcionando uma avaliação da estabilidade do processo CCC. Em b) se encontra uma maior regularidade, o que é confirmado pelos oscilogramas correspondentes.

Em relação à determinação do tempo da fase 2, observa-se a seguinte Figura, 5.20:

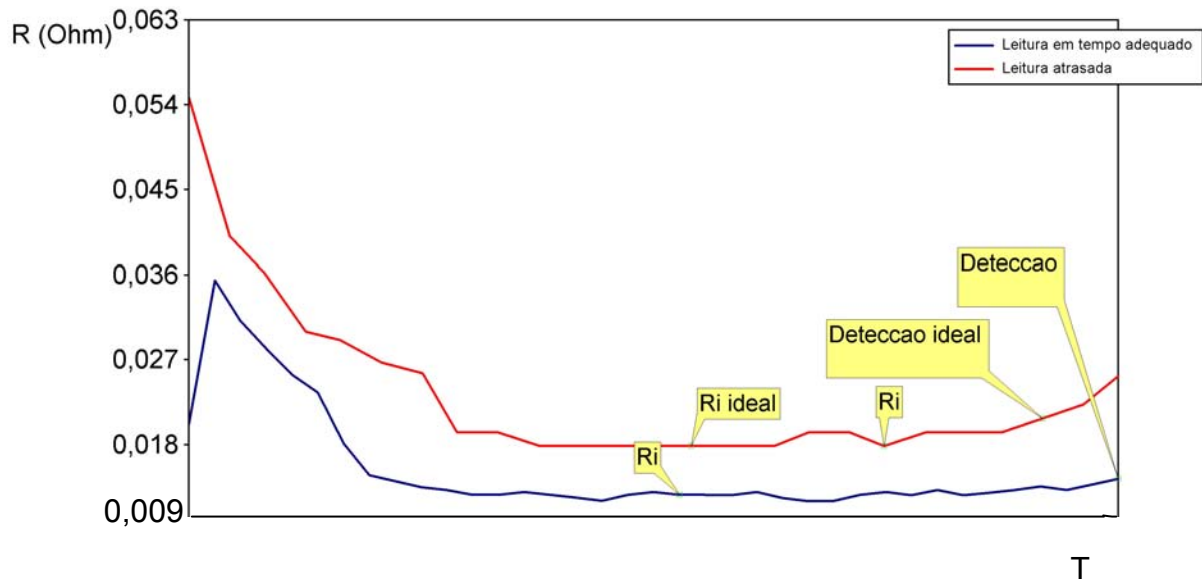


Figura 5.20 - Leitura de U_i e R_i em patamar estável (azul) e já em rampa de subida (vermelho), desfavorecendo a detecção da reignição. A escala T do eixo y ilustra o tempo.

Ambas as curvas mostram a resistência num período anterior à detecção da iminência de reabertura, e conseqüente redução da corrente, e o momento de leitura de R_i (e U_i). Este momento foi determinado por Gohr, como sendo 1 ms após o início da fase 3. Assim o tempo entre o início do curto-circuito (início da fase 2) e o momento de leitura fica dependente do tempo da fase 2. Pela figura, nota-se que, na curva vermelha, onde o tempo da fase 2 era maior, a leitura aconteceu quando a resistência já estava em rampa de subida, devido ao início de estriccioneamento da ponte metálica. Na curva azul, vê-se que a leitura se deu num momento de patamar estável, fazendo com que a detecção de iminência de reignição fosse mais eficiente, e que esta ocorresse na fase 4, como é desejado.

Neste mesmo sentido, o fator K_{rab} também é fundamental. Ele foi descrito por Gohr e representa percentualmente um valor de resistência em relação a R_i . Ou seja:

$$K_{rab} = (R_{ig}/R_i) * 100 \quad (10),$$

onde R_{ig} é a resistência de iminência de reignição. Quando este valor for atingido pela resistência instantânea, determina a descida da corrente, início da fase 4. Exemplificando: quando o K_{rab} for regulado em 120, significa que, quando a resistência instantânea for maior que a R_i em 20 %, o sistema detectará a iminência de reignição do arco e, então, passará à fase 4, reduzindo a corrente. O valor de K_{rab} foi sendo modificado, e o arquivo DIGI2TF4 e os oscilogramas avaliados, até que se achasse a melhor condição, chegando-se ao valor 110, adotado como padrão.

Neste ponto, é interessante verificar o comportamento da ponte metálica durante o curto-circuito. Nota-se, na Tabela 5.8, que, para um aumento de 30 A na corrente da fase 3, o tempo para formação da ponte metálica se mantém praticamente constante. Porém, o tempo para a fratura da ponte, do início do estriccionamento (revelado pelo início da rampa de resistência no oscilograma) até o destacamento, é reduzido. Isto vai ao encontro do exposto na revisão bibliográfica, e se explica pelo fato de as forças eletromagnéticas serem proporcionais ao quadrado da corrente e a sua densidade. Apesar de não ter havido um estudo estatístico mais apurado, e de a avaliação da dinâmica da ponte ter sido feita indiretamente, pela observação dos oscilogramas, as conclusões tendem a concordar com resultados da literatura. Esta é uma questão cuja investigação mais adequada se daria com aplicação de filmagem em alta-velocidade.

Tabela 5.8 - Tempos de destacamento (t_{cc}), tempo aparente de formação de estabilização da ponte líquida metálica (t_{ponte}) e tempo entre o início da estriçcao até a fratura da ponte (t_{frat}) para diferentes I_{f3} e V_g semelhantes. Tempos em ms.

I_{f3} (A)	t_{cc} (ms)	t_{ponte} (ms)	t_{frat} (ms)
300	2,80	2,71	0,05
270	3,27	2,76	0,17

O tempo 4 foi mantido aquele determinado por Gohr, 1 ms, levando em consideração o exposto por Ishchenko e Lebedev [52]. Os tempos das rampas e da fase 6 foram determinados por tentativa e erro, até se chegar a um arco de comportamento regular, e foram mantidos constantes daí em diante.

Em relação às correntes, também se partiu dos valores de Baixo [20]. Foram sendo alteradas até que se chegasse a um arco estável, e mantidas constantes ao

longo do desenvolvimento. A Tabela 5.9 mostra, então os valores adotados, para uma situação:

Tabela 5.9 - Regulagem prévia para verificação do processo

Variável	Valor adotado
Tempo da fase 2 (tf2)	0,5 ms
Corrente da fase 2 (If2)	30 A
Corrente da fase 3 (If3)	270 A
Krab	110
Tempo da fase 4 (tf4)	1 ms
Corrente da fase 4 (If4)	30 A
Corrente da fase 5 (If5)	250 A
Tempo da rampa 6 (td6)	3 ms
Tempo da fase 6 (tf6)	3 ms
Corrente da fase 6 (If6)	3 ms
Tempo da rampa 1 (td1)	3 ms
Corrente da fase 1 (If1)	50 A
Tensão de curto-circuito (Ucc)	12 V
Velocidade de arame (Va)	3 m/min
Vazão de gás (não regulável no sistema)	13 l/min

Foram incorporados também, ferramentas de manutenção da operação no caso de anormalidades. Assim, caso o curto-circuito se estenda por mais de 5 ms na fase 3, ou se detecte curto-circuito em outra fase, há um pico de corrente para que a transferência se concretize.

A interface do programa, é amigável e similar à de outros equipamento desenvolvido pelo LABSOLDA, a fonte eletrônica digital DIGITEC, permitindo a regulagem de todos os parâmetros e variáveis envolvidos. Uma das telas está mostrada na Figura 5.21:

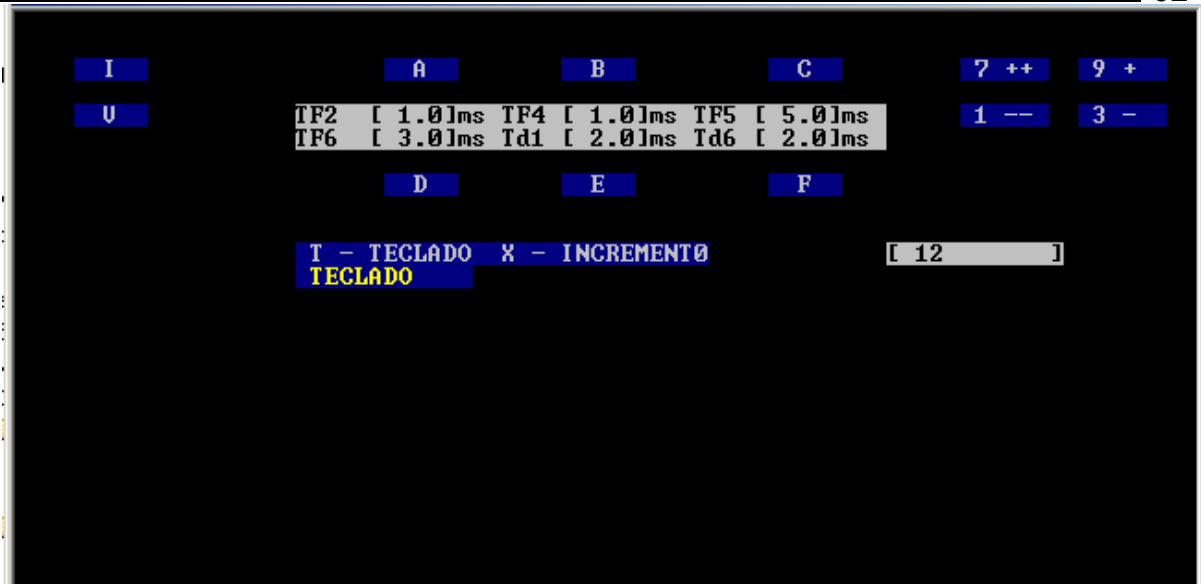


Figura 5.21 - Tela do programa de controle, DIGI2000.

Contendo os valores ótimos encontrados, a forma de onda resultante é mostrada na Figura 5.22:

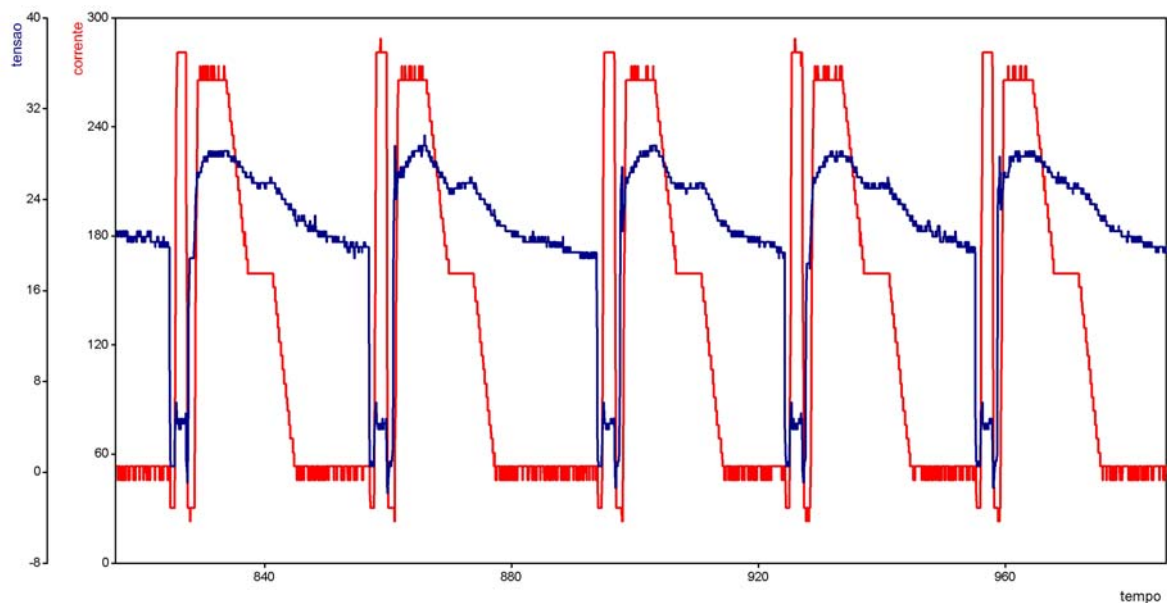


Figura 5.22 - Forma de onda final, em um ensaio semi-automático.

5.2.2 - Geração de respingos na reignição do arco

Uma questão que surgiu ao longo do trabalho foi relativa ao momento crítico de geração de respingos. A pergunta era se valiam à pena os esforços para se tentar reduzir o nível de respingos ao final do curto-circuito, no momento de rompimento da ponte metálica.

Lançando-se mão da flexibilidade da bancada, foram realizados ensaios forçando, para condições de soldagem similares, a reignição do arco em corrente

alta e baixa. Isto foi feito igualando-se a corrente da fase 4 à da fase 3. Uma quantificação do nível de respingos não foi feita. Uma avaliação qualitativa foi realizada através de fotos realizadas com maior tempo de aquisição de imagem, que se mostrou suficiente para concluir que a reignição em correntes baixas (letra c) na Figura 5.23) é mais atrativa em termos de geração de respingos. O MIG/MAG convencional em transferência metálica por curto-circuito também é mostrado, evidenciando seu pior desempenho, neste quesito.

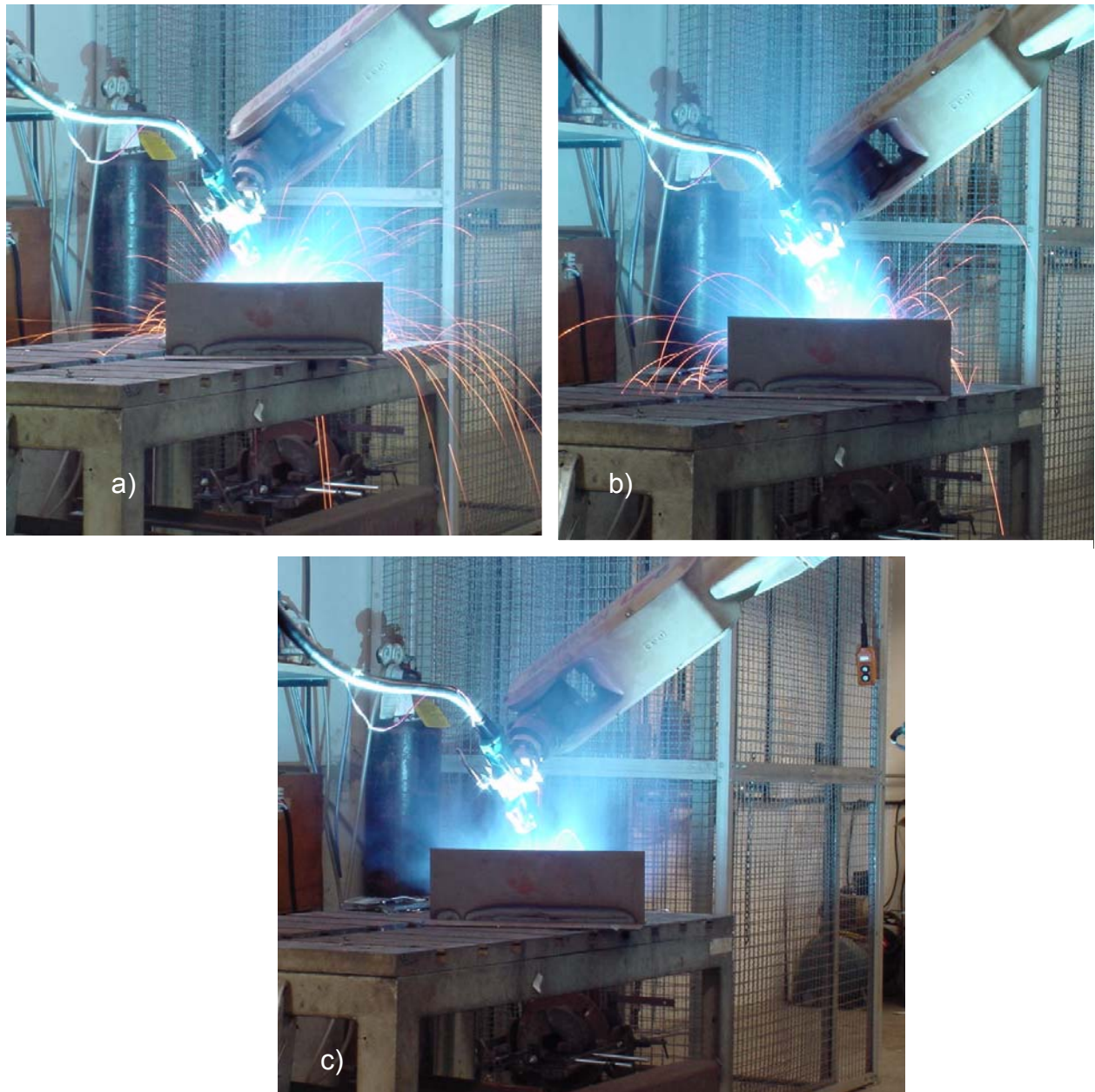


Figura 5.23 - Geração de respingos: a) MIG/MAG convencional por curto-circuito; b) CCC reignição em corrente alta; c) CCC, reignição em corrente baixa. Condições similares consideradas: mesma V_a e mesmo V_g .

5.2.3 - Estudos sobre a penetração

Uma das vantagens e funções atribuídas aos sistemas MIG/MAG TMCCC é o controle da penetração, independentemente da velocidade de material. No MIG/MAG convencional em transferência metálica por curto-circuito, sabidamente isto não é possível, pois para maior penetração (mantendo-se os parâmetros constantes) se necessita maior corrente média, demandando mais material de adição aportado. Conforme as experiências descritas no item 5.1.3, a corrente na fase de arco é grande candidata à responsável pela determinação da penetração. No entanto, Baixo [20] concluiu que pequenas alterações na corrente de arco acarretam em grandes alterações no volume da gota fundida, tendo com conseqüência direta a instabilidade da transferência, aconselhando, então, que se mantenha a corrente de arco imutável.

Assim, foi decidido que se estudaria a penetração alterando-se o tempo da fase 5 e conseqüentemente, o volume da gota metálica.

Em sua Tese de Doutorado, Baixo [20] validou a relação

$$V_f = C \times I_{f5}^2 \times t_{f5} \quad (11)$$

onde V_f é o volume da gota e C uma constante dependente da DBP e da velocidade de arame. Desta maneira, fazia-se uma solda estável, obtendo-se um valor para C (média de três medições), e, a partir dele, se variava o V_f , pois os outros valores permaneceram constantes.

Ao se realizarem os ensaios, no entanto, verificou-se que existia contribuição considerável das outras fases de arco aberto em V_f . Isso motivou o desenvolvimento de um programa (CALCVF) em linguagem C++, do qual se extrai a contribuição de cada fase de arco aberto para a formação do V_f , utilizando a relação (12) acima. Assim, para o caso da forma de onda adotada, se adotou a seguinte relação:

$$V_f = C(I_{f5}^2 \cdot t_{f5} + \sum_0^{td6} I^2 \cdot t + I_{f6}^2 \cdot t_{f6} + \sum_0^{td1} I^2 \cdot t + I_{f1}^2 \cdot t_{f1}) \quad (12)$$

As variáveis de tempo e corrente utilizadas são fornecidas ao programa CALCVF, assim como o V_f , determinado do ensaio de solda. Aplicando a equação acima, ele retorna o valor de C , o qual é, então, utilizado para a determinação do t_{f5}

a ser utilizado para se obterem outros valores de V_f desejados. Mais testes devem ser realizados com esse programa, para sua completa validação.

Mais tarde, levantou-se uma dúvida acerca da validade da relação (12) para correntes abaixo de cerca de 150 A, pois os resultados de Baixo [20] se deram em correntes neste valor. No entanto, já se tinha verificado que a contribuição da rampa 1 e da fase 1 para V_f era muito pequena em relação às outras fases. Então, estudos mais criteriosos sobre esse assunto não foram realizados, considerando-se que, ao final da fase 6, o V_f já estava determinado. De fato, o que acontece é que o valor de C cai com o aumento do volume de gota. Baixo [20], observou uma associação entre uma menor eficiência de transmissão de calor da interface arco/gota para a frente de fusão para maiores volumes de gota. Ou seja, o fato de se desprezar o V_f formado na fase 1 e rampa 1 pode ser, também, justificado pela redução de C conforme a gota cresce.

O volume da gota foi, então, variado para verificação de sua influência na penetração. Lembra-se que, para isso, de todos os parâmetros e variáveis, apenas o tf_5 foi alterado. O resultado mostrado abaixo, na Figura 5.24 revela maiores penetrações para maiores volumes. Em face disso, se levanta a hipótese de que, para maiores volumes, onde há um maior período de arco e maior tempo em corrente alta (lf_5), há um maior efeito do vortex, aumentando a eficiência na transferência de calor para o material de base, tanto pela gota, quanto pelo próprio arco.

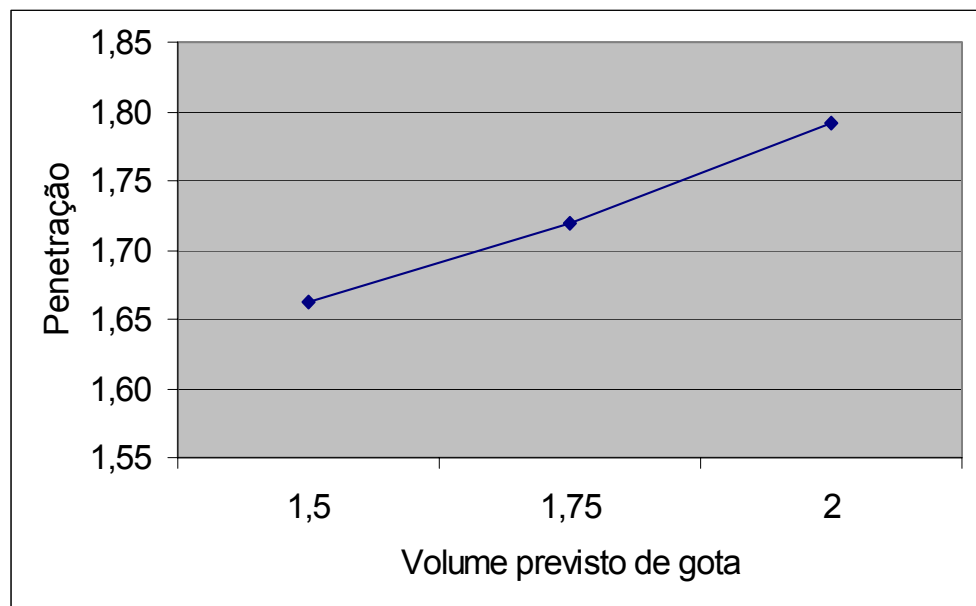


Figura 5.24 - Efeito do volume de gota (mm^3) sobre a penetração (mm).

5.2.4 - Estudos sobre o Aporte Térmico

Bastante citado na literatura, também, é o menor aporte térmico de sistemas MIG/MAG TMCCC em relação ao processo convencional. São mencionadas grandes diferenças, como mostra a Tabela 5.10.

Tabela 5.10 - Quantificações de aporte térmico encontradas na literatura.

Processo	Aporte térmico	
MIG/MAG TMCCC	0,5 a 0,8 kJ/mm [40]	0,3 kJ/mm [44]
MIG/MAG convencional, em transferência metálica por curto-circuito	0,8 a 2,0 kJ/mm [40]	0,98 a 1,2 kJ/mm [44]

Não se diz, porém, como esses valores foram calculados, ou a que se devem estes menores valores quando há controle de corrente. Cogita-se que possa ter sido utilizada uma velocidade de soldagem mais alta para o MIG/MAG TMCCC, pois esta é uma vantagem freqüentemente mencionada na literatura.

Foi realizada, então, uma comparação entre as potências geradas em ambos os processos. Foi considerado adequado manter como parâmetros de comparação a velocidade de arame, e velocidade de soldagem, mantendo-se um volume médio da gota similar, em soldas estáveis. Visualiza-se nas Figuras 5.25 e 5.26 (potências geradas em cada processo) e na Tabela 5.11 (potências médias) a confirmação de que a potência é maior no processo convencional.

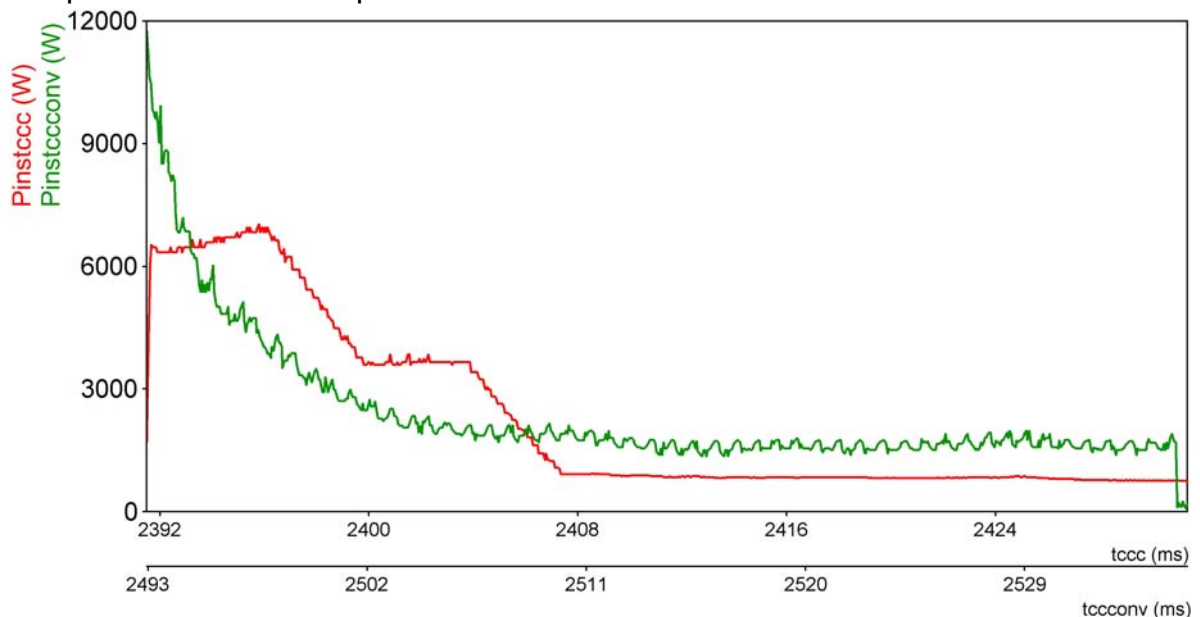


Figura 5.25 - Potência instantânea ao longo do período de arco: Pinstccc: potencia do CCC; Pinstcccconv: potencia do MIG/MAG convencional.

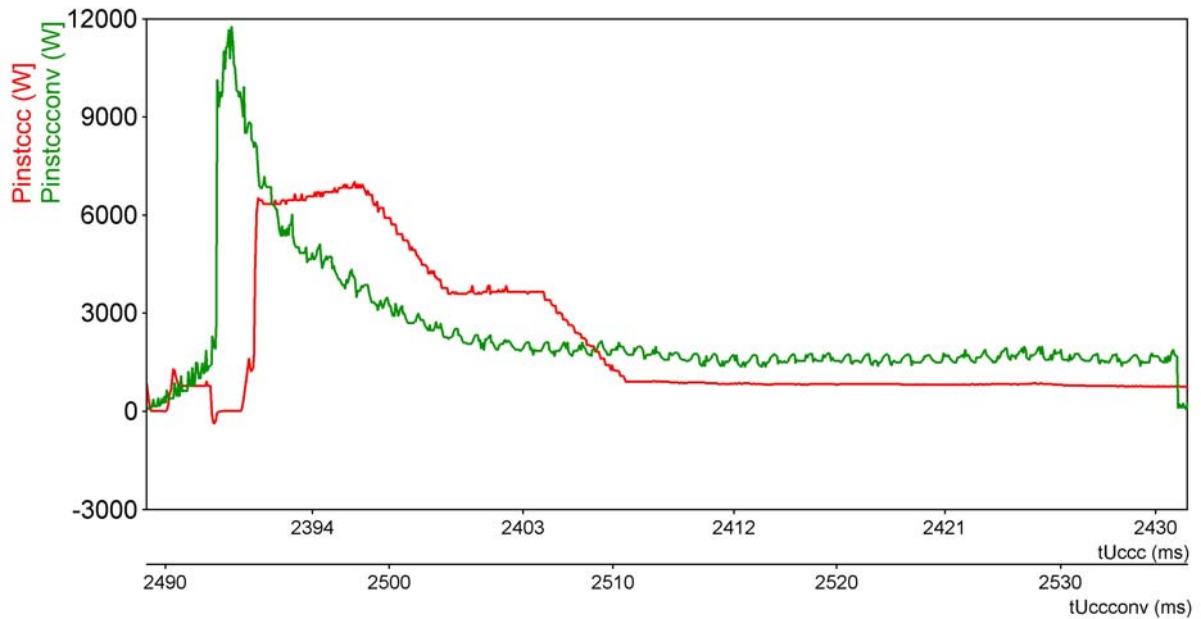


Figura 5.26 - Potência instantânea ao longo de um período de transferência, incluindo o curto-circuito. Pinstccc: potência do CCC; Pinstcccconv: potência do MIG/MAG convencional.

Tabela 5.11 - Tabela das potências médias nos tempos das duas figuras anteriores, no tempo de arco e no período de uma transferência de gota.

Processo	Potência média (W)	
MIG/MAG convencional em transferência metálica por curto-circuito	arco	2397
	periodo	2397
CCC	arco	2307
	periodo	2116

Mas, por outro lado, não é tão superior como sugere a literatura acima citada. O fato é que o processo MIG/MAG convencional apresenta menor eficiência que o MIG/MAG TMCCC. Explica-se: no primeiro, a variável controlada é a tensão, sendo a corrente no período de arco, no qual a gota se forma, dependente da mesma. Então, depois de formada a gota, a corrente continua obedecendo à tensão, se mantendo em um nível onde há sobreaquecimento da gota e vaporização metálica (50 % maior [40]), que é diretamente proporcional à temperatura da superfície. No segundo, a corrente é controlada, ou seja, depois de formado o volume de gota, a corrente é reduzida a um nível onde há menos sobreaquecimento e conseqüente menor desperdício de energia por evaporação. Ou seja, teoricamente, também o

calor levado à peça pela gota seria menor. Medições com calorímetros seriam mais adequadas para avaliar esta questão. Do exposto, conclui-se que, realmente, a expressão (10) não reflete adequadamente o aporte térmico, pois os processos têm eficiências diferentes. Dados dos ensaios estão na Tabela 5.12.

Tabela 5.12 - Tabela de dados dos ensaios acima.

MIG/MAG convencional		CCC	
Va (m/min)	3	Va (m/min)	3
Vs (cm/min)	30	Vs (cm/min)	aproximadamente 30
Uref (V)	23	Gás/vazão (l/min)	Ar + 25% CO ₂ /13
Gás/vazão (l/min)	Ar + 25% CO ₂ /13	tipo	Semi-automático
tipo	robotizado		

5.2.5 - Determinação do sistema de controle da regularidade da transferência metálica

A capacidade do CCC de se adaptar às oscilações impostas pelo soldador à tocha de soldagem é de fundamental importância principalmente no caso atacado, onde há um movimento da junta a ser soldada, devido ao balanço da embarcação sobre a qual a construção da *pipeline* é realizada. Para isso, o sistema necessita de um sensor que informe a DBP, e então possa fornecer, no período de arco, a energia adequada para manter a regularidade da transferência, ou seja, manter o tamanho das gotas constante. Esta energia é regulada, no CCC, pelo tempo da fase 5, tf_5 , o mais significativo na determinação das dimensões da gota.

O CCC utiliza o sinal de tensão U_i , lido no mesmo instante que R_i , para determinação da DBP. Aqui também é importante que o sinal seja adquirido num patamar estável de tensão, fornecendo um reflexo mais confiável da DBP. A Figura 5.10 mostra vários segmentos da fase de curto-circuito, da mesma solda. Nota-se que se escolheu um momento de leitura de U_i dentro de um patamar estável, e também a pouca variação deste valor para os vários curtos-circuitos, comprovando a validade deste método da medição de DBP. Um melhor retrato disso está na Figura 5.12, extraída do arquivo DIGI200R, que fornece, também, as leituras pontuais de U_i

nos curtos-circuitos do período adquirido. A pequena variação se deve ao pequeno passo de DBP, de 1mm.

Assim, através de ensaios robotizados, foi gerada a Tabela 5.13 relacionando U_i e DBP, para a faixa de DBP abordada no trabalho, descrita no item 5.1.2, com intervalos de 1 mm. Na mesma bateria de ensaios, foi estabelecido o tempo da fase 5, tf_5 , para cada DBP, a fim de se manter o mesmo volume fundido. Foi gerada a Tabela 5.15 que relaciona U_i e tf_5 . Desta tabela, o *software* de controle DIGI2000 gera uma curva de tf_5 por U_i , a qual ele utiliza para o controle. Ou seja, mesmo que a DBP saia da faixa estipulada (acredita-se haver um limite), o sistema pode extrapolar a curva para outros valores.

Tabela 5.13 - Relacionamento entre DBP para a junta abordada e U_i lido no curso do CCC.

U_i (V)	DBP (mm)
2,73	7
2,91	8
2,96	9
3,42	10

Tabela 5.14 - Valores introduzidos no software de controle do CCC, gerando uma curva para determinação do tf_5 em função da DBP.

U_i (V)	tf_5 (ms)
2,73	4,5
2,91	4,2
2,96	4,1
3,42	3,7

É importante frisar que, para a determinação das tabelas, era utilizado o chamado “DIGI2000 de desenvolvimento”, no qual a regulagem de tf_5 é possível. Na versão final do DIGI2000, tf_5 é controlado pelo sistema como descrito acima.

5.2.6 - Testes em chanfros

Estando o CCC disponibilizado, partiu-se para os testes semi-automáticos, realizados pelo soldador, em corpos de prova chanfrados, simulando a situação real. À primeira vista, a vantagem freqüentemente citada na literatura, de facilidade de adaptação, se confirmou. Logo na primeira solda, após algumas instruções do autor, o soldador realizou um passe de raiz visualmente aceitável. O nível de respingos foi muito baixo, praticamente inexistente em comparação com ER e MIG/MAG convencional, ocorrendo apenas em rápidos e esparsos momentos de clara instabilidade, não sendo, como nos outros dois, inerentes ao processo. Naturalmente, se efetuaram pequenas regulagens nas variáveis, o que era esperado quando se passasse da solda robotizada à solda semi-automática.

De nada adiantariam as vantagens de estabilidade, se a solda não resultasse num passe de raiz geometricamente aceitável por norma. A Figura 5.27 mostra os requerimentos demandados pelas normas ASME para vasos de pressão e a AWS D1.1 para solda de aços estruturais. A foto da Figura 5.28, seção transversal de um passe de raiz realizado semi-automáticamente pelo CCC, evidencia que esses requerimentos são preenchidos. Embaixo dele, na mesma figura, vê-se a geometria comumente encontrada em um passe de raiz com ER celulósico [83], com mordeduras e baixo ângulo de transição θ .

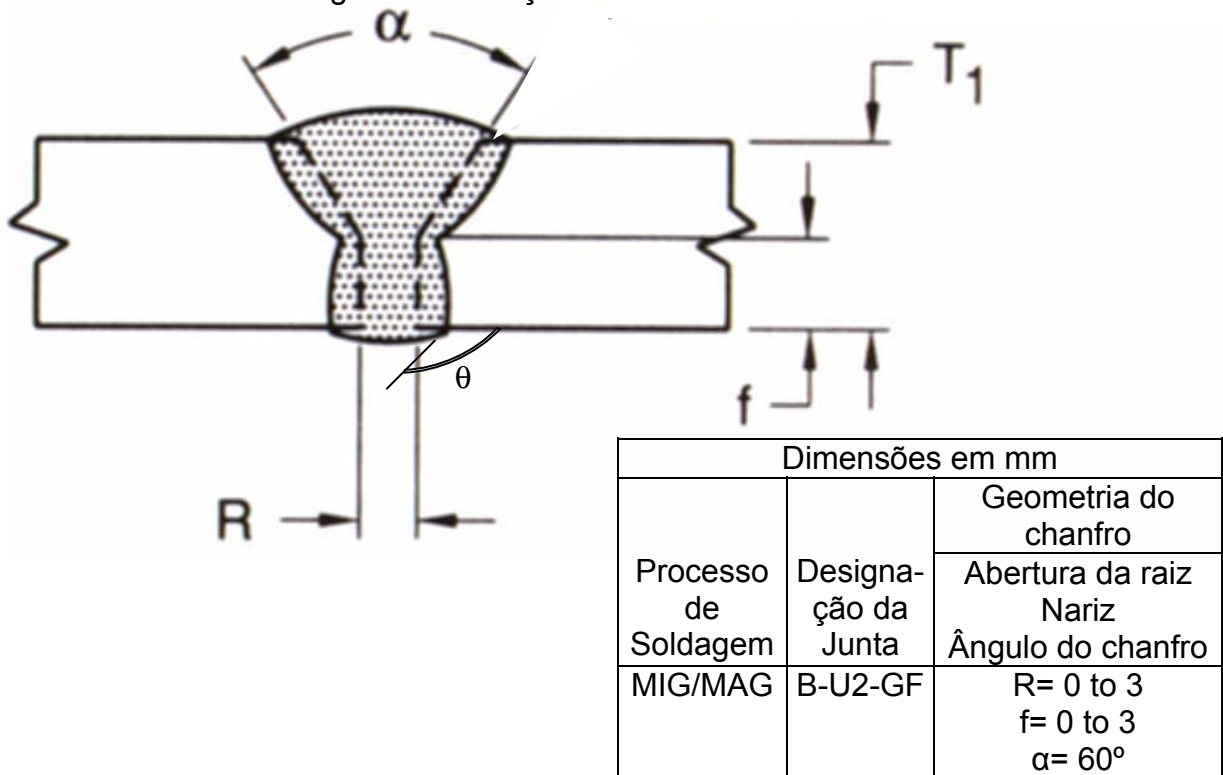


Figura 5.27 - Geometria demandada por norma para o passe de raiz, admitindo-se mordedura de até 0,1 mm. T1 é ilimitado [94].

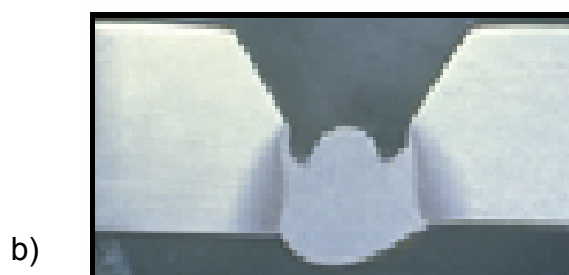
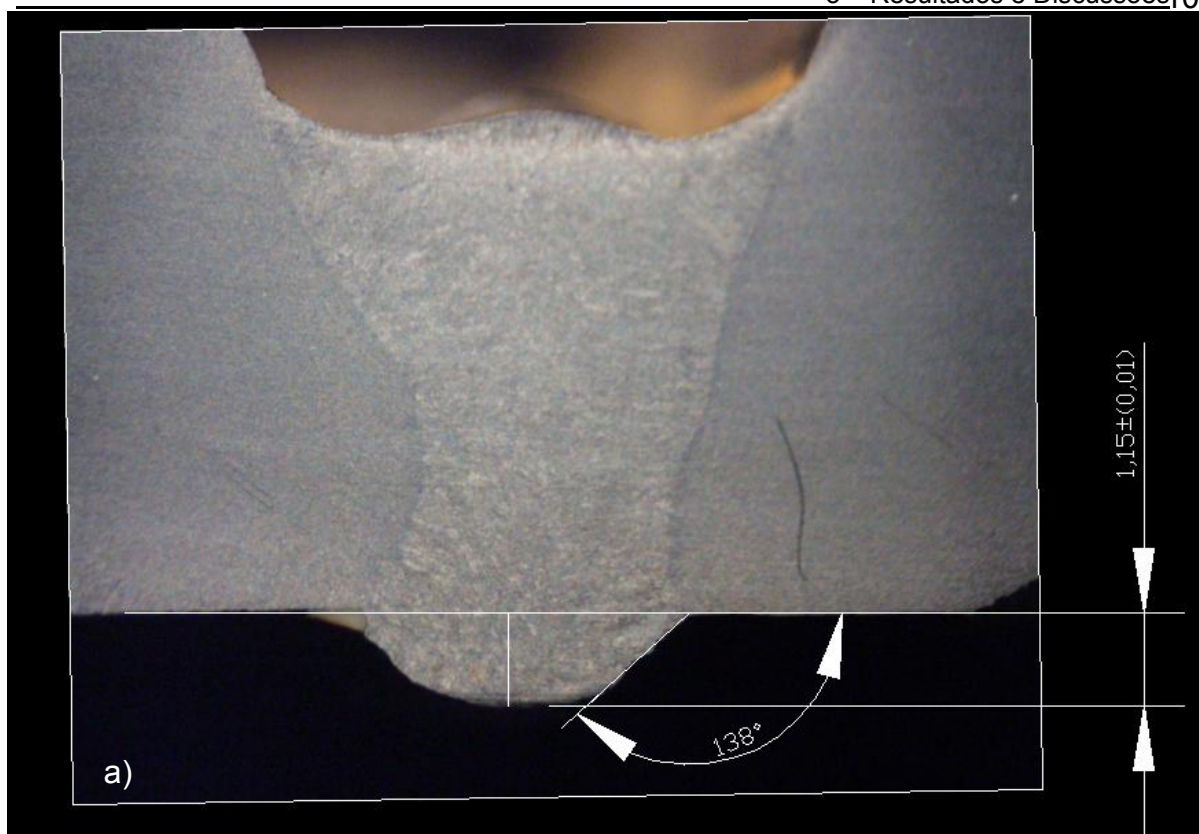


Figura 5.28 - Geometria da seção transversal de: a) um passe de raiz executado com o CCC e b) o passe de raiz normalmente resultante do ER celulósico. [83]

Também é citado pela AWS D1.1 que a transição entre o reforço da raiz e o material de base deve ser suave. Isto objetiva a redução do efeito entalhe e aumento da resistência à fadiga. No caso dos dutos, mostrou-se que um maior ângulo de transição θ , representa maior resistência à fadiga [53], além de que a homogeneidade desse ângulo ao longo da solda também é de grande importância.

Como mostra a Figura 5.28 acima, o CCC pode propiciar um ângulo de transição θ de 138° , plenamente satisfatório, de acordo com os resultados de [53].

Adicionadas às comparações de produtividade entre ER e MIG/MAG convencional, realizadas por Baixo, as realizadas preliminarmente entre o ER e CCC confirmaram o ganho que pode ser conseguido neste quesito, ao se substituir o processo atual por um semi-automático. A tabela 5.15 demonstra isso, para um passe de raiz de 350 mm de comprimento. A corrente média de soldagem, para os dois processos, ficou em torno de 120 A.

Tabela 5.15 - Comparação preliminar entre o CCC e o ER celulósico. Tempos para um passe de raiz de 350 mm de comprimento, na posição plana.

Processo	Tempo para raiz de 350 mm, posição plana
ER celulósico	4 min
CCC	2 min 6 s

Em relação ao nível de respingos a diferença é muito clara, como mostra a Figura 5.34

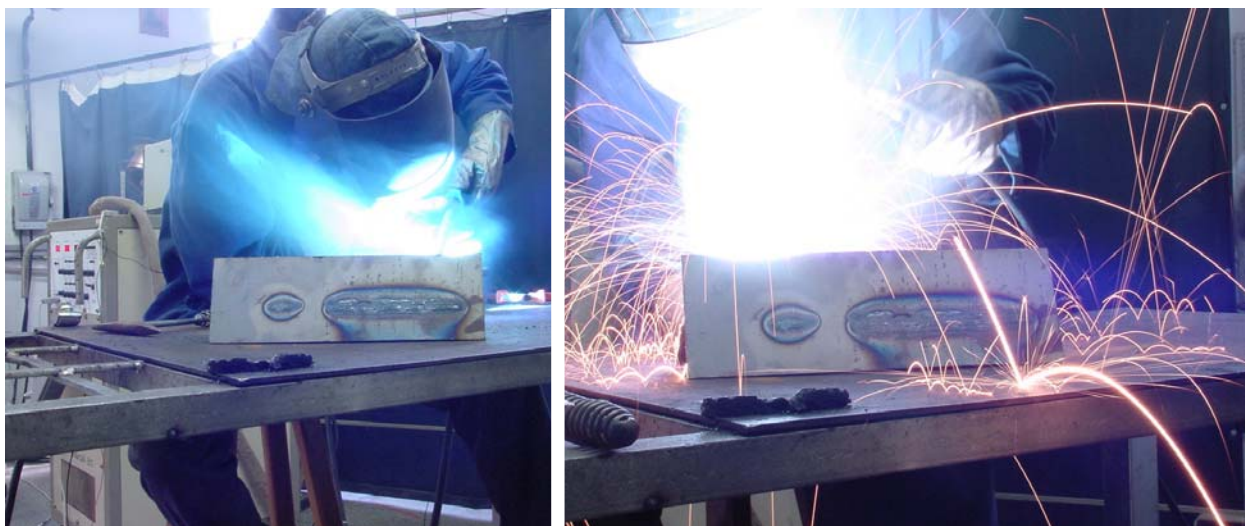


Figura 5.29 - Avaliação visual da nível de respingos de cada processo, na mesma operação: a) CCC e b) ER celulósico.

Observou-se, também, que o tempo de treinamento para que o soldador conseguisse realizar uma solda visualmente aceitável foi maior para o ER. Além disso, é válido mencionar o depoimento do soldador, no qual ele exaltou a facilidade de se realizar o passe de raiz e o muito maior conforto na operação, devido à redução de respingos, propiciados pelo CCC.

5.2.7 - Ensaio preliminares com CO₂ puro

A título informativo, foram realizadas experiências com CO₂ puro, partindo-se dos valores do CCC. Naturalmente, estes tiveram que ser alterados (Tabela 5.18), devido às diferentes características de transferência metálica e aquecimento que esse gás apresenta. O objetivo buscado foi a estabilidade do arco, para apenas uma DBP. Num processo de tentativa e erro, foi alcançada uma situação satisfatória, como mostra o oscilograma da Figura 5.30,

Tabela 5.16 - Regulagem do CCC para o CO₂

Variável	Valor adotado
Tempo da fase 2 (tf2)	1 ms
Corrente da fase 2 (If2)	20 A
Corrente da fase 3 (If3)	320 A
Krab	116
Tempo da fase 4 (tf4)	1,4 ms
Corrente da fase 4 (If4)	20 A
Corrente da fase 5 (If5)	320 A
Tempo da fase 5 (tf5)	5 ms
Tempo da rampa 6 (td6)	2 ms
Tempo da fase 6 (tf6)	3 ms
Corrente da fase 6 (If6)	150 A
Tempo da rampa 1 (td1)	2 ms
Corrente da fase 1 (If1)	40 A
Tensão de curto-circuito (Ucc)	12 V
Velocidade de arame (Va)	3 m/min
Vazão de gás (não regulável no sistema)	13 l/min

O diâmetro de gota, no entanto, foi considerado alto. Numa tentativa de reduzi-lo, não foi possível encontrar outra situação estável, e não se deu

prosseguimento a esse intuito. Ressalta-se que essa interrupção ocorreu por escassez de tempo, sendo a viabilização do CCC para o CO₂ puro um dos passos a serem seguidos.

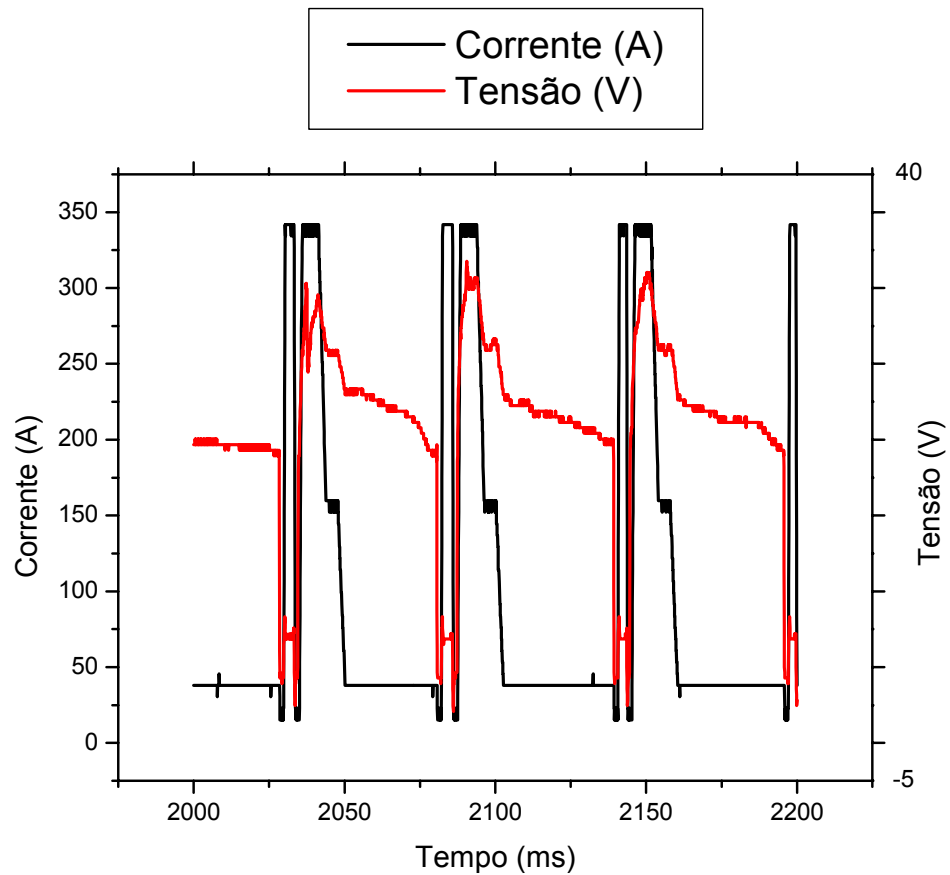


Figura 5.30 - Oscilograma do CCC para a regulagem para CO₂ atingida.

Uma boa perspectiva foi avistada na comparação de respingos entre o CCC e o MIG/MAG convencional, por curto-circuito, reproduzida na Figura 5.31 abaixo.

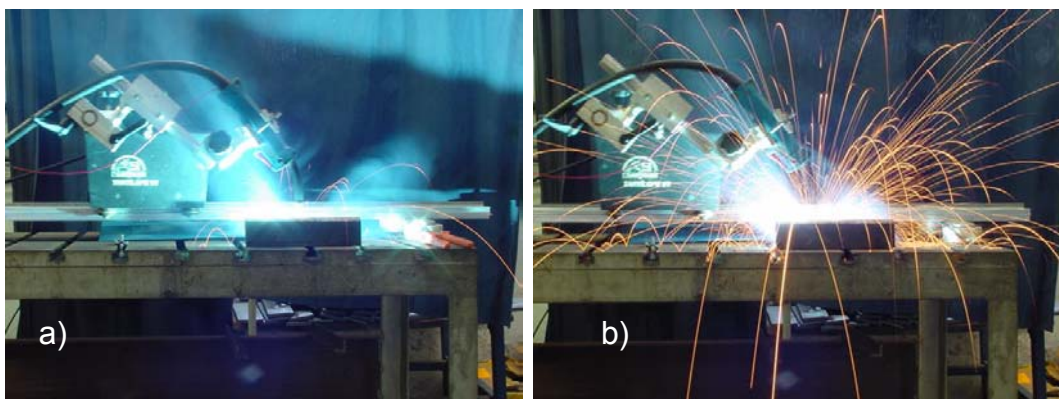


Figura 5.31 - Comparação da geração de respingos para a) CCC e b) MIG/MAG convencional, ambos com CO₂ puro como gás de proteção.

6 - Conclusões e Sugestões para Trabalhos Futuros

Numa avaliação dos resultados, conclui-se que a aplicação do CCC para o passe de raiz na solda de tubulações petrolíferas em substituição ao ER é, potencialmente, técnica e economicamente recomendável. Naturalmente, para que isso se concretize, é necessário um trabalho junto intenso aos engenheiros das empresas construtoras destas *pipelines*, seus clientes e, por último, mas não menos importante, junto aos soldadores, em aplicações em campo. Ainda é necessária a validação para a posição 5G, sendo que resultados de testes preliminares nas posições 3G (vertical descendente) e 4G (sobre-cabeça) indicaram ser apenas uma questão de regulagens (que podem ser feitas *online*, durante a execução da solda, pelo próprio soldador, através de pedal ou similar) e ajustes no procedimento.

As ferramentas criadas para análise do processo (pacote de arquivos DIGI) consistem num grande salto, fazendo parte de uma metodologia para o desenvolvimento, expansão e evolução do CCC. Ou seja, considera-se importante a continuidade desse desenvolvimento, em face dos resultados promissores, com vistas à futura implementação em equipamento comercial e aplicação integrada a um cabeçote para soldagem orbital MIG/MAG mecanizada, cujos estudos já se iniciaram no LABSOLDA.

Durante os estudos verificou-se, também, que deve haver uma avaliação da necessidade de uso do CCC para diferentes aplicações, pois mesmo com a utilização de CO₂ puro como gás de proteção, regulagens adequadas de parâmetros e variáveis do MIG/MAG por curto-circuito convencional podem propiciar uma solda satisfatória. Isto é ressaltado devido à diferença de investimento para os respectivos equipamentos, consideravelmente superior para o CCC. No entanto, para o passe de raiz em dutos, devido à sua criticidade e requerimentos rígidos de qualidade e produtividade, as vantagens do CCC são indiscutíveis.

É importante citar o fomento à formação de recursos humanos relacionados à área de petróleo e gás. Este setor se encontra em franca expansão no Brasil, apresentando uma crescente demanda por pessoal especializado. Aliás, aí se encontram outras potenciais aplicações para o CCC, devido ao crescimento da indústria naval e a recente decisão do Governo Federal em se “nacionalizar” a construção das plataformas petrolíferas. Trata-se de um setor que aplica muito aço de baixo carbono, soldando-o, ainda, com ER (na maioria dos casos) e MIG/MAG convencional em atmosfera protetora de CO₂ puro.

Consistindo numa inovação tecnológica, visa-se o requerimento de Patente de Invenção, categoria Processos, como já feito pelo LABSOLDA com o Processo de Soldagem MIG/MAG com Pulsação Térmica ou Duplamente Pulsado.

Sugerem-se, ainda, trabalhos de pesquisa e desenvolvimento para, com a aplicação de uma metodologia adequada, expandir o uso do CCC, para outras situações de soldagem, como outros materiais (aço inoxidável, ligas leves), diversas bitolas de arame e outros gases de proteção. Como levantado ao longo do texto, se sugerem estudos mais aprofundados sobre funções atribuídas aos sistemas como o CCC, ou seja, controle do aporte térmico e controle da penetração, assim como filmagens em alta-velocidade, elucidando questões relativas à transferência metálica (formação da gota, dinâmica da ponte metálica). Também com a participação desta ferramenta, é interessante o estudo de outras formas de onda, e outras estratégias de controle numa busca pela otimização do CCC.

Uma avaliação da estabilidade no CCC, decorrente da análise das tensões médias no período de arco e respectivo desvio padrão, pode ser verificada, assim melhorias nas técnicas para otimização do início e fim da solda.

7 - Referências Bibliográficas

- [1] QUITES, Almir M.; DUTRA, Jair C. **Tecnologia da Soldagem a Arco Voltaico**. Florianópolis: EDEME, 1979, 248 p.
- [2] MOYER, N. The Evolution of Shielding Gás. **Welding Journal**, Miami, v. 81, n. 9, p. 51-52, Sep. 2002.
- [3] TWI WORLD CENTRE FOR MATERIALS JOINING TECHNOLOGY. **Solid wire MIG welding**. Disponível em www.twi.co.uk . Acesso em 20/01/2004.
- [4] STENBAKCA, N.; PERSSON, K. Shielding gases for Gas Metal Arc Welding. **Weding Journal**, Miami, v. 8, n. 11, p. 41-47, nov. 1989.
- [5] MANUFACTURINGTALK. **UK welding market confidence underlined**. Disponível em www.manufacturingtalk.com Acesso em 02/03/2004.
- [6] INFOSHOP. **Metal Welding Equipment and Supplies**. Disponível em www.the-infoshop.com Acesso em 15/02/2004.
- [7] SHIELDED Metal Arc Welding in Transportation Pipelines. KOBELCO Welding Today. Technical Report, 2001. 5 p.
- [8] BAIXO, C. E. I. **Relatório de Atividades**. Florianópolis, 02/06/2002. Relatório 42 p.
- [9] FIELD Pipe Welding – Is stick stuck ? **Miller Technical Articles**. Appletown. Disponível em www.millerwelds.com Acesso em mar. 2004
- [10] SILVA, R. H. G. et al. Desenvolvimento do processo MIG/MAG com curto-circuito controlado para a soldagem de reparo e união de dutos. In: 2. Congresso Brasileiro de P&D em Petróleo e Gás. 2003. Rio de Janeiro. **Anais**. 2003. CD. Adobe Acrobat Reader.
- [11] PAN, J. L. Study of Welding Arc Control in China. **Welding Journal**, Miami, v. 65, n. 3, p. 37-46, Mar. 1986.
- [12] SOLDAGEM MIG/MAG. **Prospecto AGA**, mai. 2002.
- [13] GOHR JR., R. **Projeto e realização de uma fonte de energia para soldagem multiprocesso**. Projeto submetido à FUNCITEC. Nov 2004.
- [14] AUTOMAÇÃO: Há uma revolução acontecendo. **Solução**. Periódico Institucional da ESAB Brasil. mai. 2003. p. 6-7
- [15] BUSINESS Wire. Welding market still holds select opportunities, but targeted strategies and competitive edge remain real key to growth and expansion. **Business Wire Articles**. Londres, jan. 2004. Disponível em www.findarticles.com Acesso em 15/08/2004.

- [16] MORAES, J. inovações tecnológicas abrem novas perspectivas para fabricantes de gás, equipamentos e consumíveis. **Metalurgia & Materiais**. ed. 527. Disponível em www.revistametalurgia.com.br Acesso em 27/09/2004
- [17] WASZINK, J. H. et al. Heat Generation and Heat Flow in the Filler Metal in GMA Welding. **Welding Journal**, Miami, v. 61, n. 8, p. 269-280, Aug. 1982.
- [18] ESSERS, W. G. et al. Heat Transfer and Penetration Mechanisms with GMA and Plasma-GMA Welding. **Welding Journal**, Miami, v. 60, n. 2, p. 37-42, Feb. 1981.
- [19] LESNEWICH, A. Control of Melting Rate and Metal Transfer in Gas-Shielded Metal-Arc Welding Part I – Control of electrode Melting Rate. **Welding Research Supplement**, p. 343-353, Aug. 1958.
- [20] BAIXO, C. E. I. **Estudo da soldagem MIG/MAG pela técnica hiperbárica a seco**. 1999.169 f. Tese (Doutorado em Engenharia) – Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis.
- [21] ESSERS, W. G.; WALTER, R. Some aspects of the penetration mechanisms in metal inert gas (MIG) welding. In: ARC PHYSICS AND WELD POOL BEHAVIOUR INTERNATIONAL CONFERENCE, 1979, Londres, **PAPERS**. Londres: The Welding Institute, 1980, v. 1. p. 289-295
- [22] HILTUNEN, V et al. Investigations and observations on material transfer in metal inert gas (MIG) welding. In: ARC PHYSICS AND WELD POOL BEHAVIOUR INTERNATIONAL CONFERENCE, 1979, Londres, **PAPERS**. Londres: The Welding Institute, 1980, v. 1. p. 149-163.
- [23] TONG, H. et al. Quality and Productivity Improvement in Aluminium Alloy Thin Sheet Welding Using alternating Current Pulsed Metal Inert Gas Welding System. **Science and Technology of Welding and Joining**, v. 6, n. 4, p. 203-208. 2001.
- [24] KIM, Y. S. EAGAR, T. W. Analysis of Metal Transfer in Gas Metal Arc Welding. **Welding Research Supplement**. p. 269-278, Jun. 1993.
- [25] AICHELE, G. The contact tube distance in gas shielded metal arc welding – How does it work ? **Welding & Cutting**. Duesseldorf, fev. 2002. p. 80-83.
- [26] VAIDYA, V. Shielding gas mixtures for semiautomatic welds. **Welding Journal**. Miami, v. 81, n. 9, p.43-48, set 2002.
- [27] AMIN, M. Synergic Pulse MIG Welding. **Metal Construction**. p. 349-353, Jun. 1981.

- [28] AMIN, M. Pulse Current Parameters for Arc Stability and Controlled Metal Transfer in Arc Welding. **Metal Construction**. p. 272-278, May. 1983.
- [29] **GAS Metal Arc Welding of Carbon Steel**. PRAXAIR. Training Program. Sept. 1999. 50 p.
- [30] GOHR JR, R. Novos métodos de controle da soldagem MIG/MAG. 2002. 138 f. Tese (Doutorado em Engenharia) – Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis.
- [31] AGÊNCIA NACIONAL DO PETRÓLEO. Superintendência de Estudos Estratégicos. **Estimativa da contribuição do setor Petróleo ao Produto Interno Bruto do Brasil: 1997-2002**. Rio de Janeiro, jul. 2004. Nota Técnica ANP n. 19
- [32] SPLICING of Steel Pipe Piles by Welding. Focus on solutions Rautaruukki METFORM. 8 p.
- [33] MORAES, J. Construção naval eleva demanda de consumíveis e substitui parcialmente o eletrodo por outros insumos. **Metalurgia & Materiais**. ed. 548. Disponível em www.revistametalurgia.com.br Acesso em 29/09/2004.
- [34] STAVA, E. K. Technology Gets to the Root of Pipe Welding. **Lincoln Electric Knowledge Articles**. Cleveland. p. 3. Disponível em: www.lincolnelectric.com. Acesso em: 25/11/03.
- [35] IRVING, Bob. Trying to Make Some Sense Out of Shielding Gases. **Welding Journal**, Miami, v. 73, n. 5, p. 65-70, May. 1994.
- [36] DEN OUDEN, G.; HERMANS, M. J. M. Process Behavior and Stability in Short Circuit Gas Metal Arc Welding. **Welding Journal**, Miami, v. 78, n. 4, p. 137-141, Apr. 1999.
- [37] CULLISON, A. Get That Spatter under Control. **Welding Journal**, Miami, v. 78, n. 4, p. 43-45, Apr. 1999.
- [38] HEAT-INPUT Control Limits Distortion and Spatter. **Welding Design and Fabrication**. p. 20-22, Aug. 1999.
- [39] LUCAS, W. et al. Process Stability in MIG Welding. **The Welding Institute Research Bulletin**. p. 329-336, Oct. 1983.
- [40] STAVA, E. K. et al. Das GMAW-STT-System: Ein Fortgeschrittenes Schweißsystem für Wurzelrohrschweißen und Blechschweißen. **DVS**. p. 71-79.
- [41] STAVA, E. K. New Surface Transfer Tension Process Speeds Pipe Welding. **Pipe Line & Gas Industry**. v. 82, n. 9, p. 55-57, Sep. 1999.

- [42] STAVA, E. K. Electric Utility Speeds Heat Exchanger Repair with New Welding Technology. **Lincoln Electric Knowledge Articles**. Cleveland. p. 2. Disponível em: <www.lincolnelectric.com>. Acesso em: 25/11/03.
- [43] STAVA, E. K. Waveform Control Speeds Root Pass. **Welding Design and Fabrication**. p. 39-42, Feb. 2001.
- [44] DERUNTZ, B. D. Assessing the Benefits of Surface Tension Transfer® Welding to Industry. **Journal of Industrial Technology**. v. 19, n. 4, p. 2-8, Aug. 2003 to Oct. 2003.
- [45] ISHCENKO, Y, R, S. Characteristics of Controlling Droplet Transfer in Consumable Electrode Short Circuit Welding. **Welding International**. v. 7, n. 11, p. 895-897. 1993.
- [46] MARUYAMA, T. et al. Current Waveform Control in Gas Shielded Arc Welding for Robotic Systems. **Kobelco Technology Review**. n. 18, p. 10-14, Apr. 1995.
- [47] HSU, C.; STAVA, E. Wire Extension Measurement During Short Circuiting Metal Transfer. In: Metal Welding and Applications. 1999. **Proceedings of the Interdisciplinary Symposium**. Met Soc, 1999. p. 351-358.
- [48] OGASAWARA, T. et al. A Power Source for Gas Shielded Arc Welding with New Current waveforms. **Welding Journal**, Miami, v. 66, n. 3, p. 57-63, Mar. 1987.
- [49] KVASOV, F. V. Special Features of Mechanized Welding with Controlled Electrode Metal Transfer. **Welding International**. v. 14, n. 2, p. 158-161. 2000.
- [50] POWER Wave® 455/STT® and Power Feed™10 Dual. **Lincoln Electric**. p. 5. Disponível em: <www.lincolnelectric.com>. Acesso em: 15/01/04.
- [51] STAVA, E. K. A New, Low-Spatter Arc Welding Machine. **Welding Journal**. p. 25-29, Jan. 1993.
- [52] POLOSKOV, S. I. et al. Control of Droplet Transfer in Consumable Electrode Welding with Short Circuiting of the Arcing Gap. **Welding International**. v. 15, p. 873-875. 2001.
- [53] ALBUQUERQUE, M. C. S. et al. Resistência à fadiga de juntas soldadas de tubulações de aço utilizadas em exploração e transporte de petróleo. In: 2. Congresso Brasileiro de P&D em Petróleo e Gás. 2003. Rio de Janeiro. **Anais**. 2003. CD. Adobe Acrobat Reader.

- [54] RUDOLPH, J. et al. Fatigue lifetime assessment procedures for welded pressure vessel components. **International Journal of Pressure Vessels and Piping**. n. 79, p. 103-112. 2002.
- [55] IMPROVEMENT techniques in welded joints. **ESDEP Course Lectures: Catholic University of Leuven**. Disponível em www.kuleuven.ac.be Acesso em 3/11/2004.
- [56] LIU, S.; SIEWERT, A. Metal Transfer in Gas Metal Arc Welding: Droplet Rate. **Welding Journal**, Miami, v. 68, n. 2, p.52-58, Feb. 1989.
- [57] MOREIRA, A.R. et al. **Líquidos: Mudanças de estado e propriedades coligativas**. Salvador. UNIFACS, 20/07/1999 Relatório.
- [58] LIN, M. L. et al. Influence of Arc Pressure on Weld Pool Geometry. **Welding Journal**, Miami, v. 64, n. 6, p. 163-169, Jun. 1985.
- [59] CHOI, S. K. et al. Dynamic Simulation of Metal Transfer in GMAW. **Welding Journal**, Miami, v. 77, n. 1, p. 38-51, Jan. 1998.
- [60] IRVING, B. Shielding Gases are the Key to Innovations in Welding. **Welding Journal**. Miami, v. 78, n. 1, p. 37-41, Jan. 1999.
- [61] **GAS Metal Arc Welding of Stainless Steel**. PRAXAIR. Training Program. Sept. 1999. 47p.
- [62] DILLENBECK, V. R. et al. The Effects of Various Shielding Gases and Associated Mixtures in GMA Welding of Mild Steel. **Welding Journal**, Miami, v. 66, n. 9, p. 45-49, Sep. 1987.
- [63] CHAE, Y. M. et al. A New Instantaneous Output Current Control Method for Inverter Arc Welding Machine. **IEEE**. p. 521-526. 1999.
- [64] SUBAN, M.; TUSEK J. Dependence of melting rate in MIG/MAG welding on the type of shielding gas used. **Journal of Materials Processing Technology**. n.119, p. 185-192. 2001.
- [65] YI, X. et al. A numerical model of wire melting rate in CO₂ gas shielded welding. **Materials & Design**. n. 23, p. 501-504. 2002.
- [66] HALMOY, E. Wire melting rate, droplet temperature and effective anode melting potential. In: ARC PHYSICS AND WELD POOL BEHAVIOUR INTERNATIONAL CONFERENCE, 1979, Londres, **PAPERS**. Londres: The Welding Institute, 1980, v. 1. p. 49-57.
- [67] RICHARDSON, I. M. et al. The Influence of Power Source Dynamics on Wire Melting Rate in Pulsed GMA Welding. **Welding Journal**, Miami, v. 73, n. 2, p. 32-37, Feb. 1994.

- [68] CAVSTEEL. **Gases de proteção para soldagem**. Disponível em www.cavsteel.com.br Acesso em 20/01/2004
- [69] KOU, S. **Welding Metallurgy**. Hoboken: John Willey and Sons, 1987, 410p.
- [70] KOU, S. **Welding Metallurgy**. 2.ed. Hoboken: John Willey and Sons, 2003, 461p.
- [71] ESSERS, W. G. Plasma with GMA Welding. **Welding Journal**. Miami, May, 1976, p. 394-400
- [72] EASSA, H. E. et al. A High Performance Welding Power Source and its Application. **IEEE**. p. 1241-1244. 1983.
- [73] LESNEWICH, A. Control of Melting Rate and Metal Transfer in Gas-Shielded Metal-Arc Welding Part II – Control of electrode Melting Rate. **Welding Research Supplement**, p. 418-425, Sep. 1958.
- [74] SLANIA, J. Determination of the Conditions for Stable Transfer of Metal From the Electrode to the Molten Pool During MAG-Welding with Short-Circuiting and Pulsating Arcs. **Welding International**. v.10, p. 849-852. 1996.
- [75] INFOMET. **MIG MAG**. Disponível em www.infomet.com.br Acesso em 20/02/2003
- [76] MITA, T. et al. Quantitative Estimatives of Arc Stability for CO₂Gas Shielded Arc Welding. **Welding International**. n. 2. p. 152-159. 1988.
- [77] MORI, R. et al. **Validação da metodologia da regularidade na transferência metálica por curto-circuito**. Florianópolis. Mar. 2002. Relatório. 13 p.
- [78] DUTRA, J. C. **Procedimento computadorizado de determinação e controle das variáveis na soldagem MIG/MAG**. 1989. 151 f. Tese (Doutorado em Engenharia) – Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis.
- [79] ORSZAGH, P. et al. Real Time Torch Height Detection Technique for Gas Metal Arc CO₂ Welding. **Science and Technology of Welding and Joining**. v. 3, n. 3, p. 139-143. 1998.
- [80] ZHANG, Y. M. et al. Double-Sided Arc Welding Increases Weld Joint Penetration. **Welding Journal**, Miami, v.77, n. 6, p. 57-61, Jun. 1998.
- [81] CHOI, J. H. et al. Simulation of Dynamic Behavior in a GMAW System. **Welding Journal**, Miami, v. 80, n. 10, p. 239-245, Oct. 2001.

- [82] WELDING'S Wave of the Future. **Lincoln Electric Knowledge Articles**. Cleveland. p. 2. Disponível em: <www.lincolnelectric.com>. Acesso em: 25/11/03.
- [83] **THE AUTOWELD SYSTEM**, Relatório Técnico. Cleveland, 1999. 6 p.
- [84] WALL, K. Honda improves productivity with STT welding process. **Lincoln Electric Knowledge Articles**, Cleveland. 4 p. Disponível em www.lincolnelectric.com Acesso em 25/11/2003.
- [85] JIAN-RONG, Y. Simulation of Droplet Transfer Process and Current Waveform Control of CO₂ Arc Welding. **Transactions of Nonferrous Metals Society of China**. v. 11, n. 5, p. 667-670. 2001.
- [86] WOHLFAHRT, H. et al. Metal inert gas welding of magnesium alloys. **Welding and Cutting**, Duesseldorf, v. 55, n. 2, p. 80-84, fev. 2003.
- [87] FORTES, C. **Arames Tubulares**. ESAB, mai. 2004. 103 p.
- [88] SILVA, R. H. G. **Influência das variáveis e parâmetro da soldagem MIG/MAG por curto-circuito**. Florianópolis, 2003. Relatório interno. 27 p.
- [89] DUTRA, J. C. et al. **Apresentação BRASILMAQ 2004.pps**. 2004. CD. 1 arquivo. Microsoft Power Point
- [90] MILLER'S new, software driven RMD process overcomes short circuit MIG limitations. **MILLER NEWS RELEASES**. Appletown, jan. 2004. Disponível em www.millerwelds.com Acesso em mar. 2004
- [91] SCHUZ, T. Ein Prozessfehler brachte die zuendende Idee. **TU Berlin Medieninformation**. Berlin, n. 199, oct. 2000. Disponível em www.tu-berlin.de Acesso em 25/11/2004.
- [92] PELLIZZARO, F. **Relatório de Bolsista ANP**. Florianópolis, ago. 2002. 7 p.
- [93] AMERICAN PETROLEUM INSTITUTE. **API 1104 Pipeline Segment**. 19. ed. Washington, sep. 1999. 70 p.
- [94] AMERICAN WELDING SOCIETY. **AWS D 1.1**. Miami, 2004, 540 p.
- [95] AMERICAN SOCIETY OF MECHANICAL ENGINEERS. **Boilers and Pressure Vessels Code**. New York. 2001. 570 p.
- [96] CORRÊA, M. A. **Diretrizes de Projeto e Qualificação Metrológica de Sistemas de Medição de Grandezas Elétricas em Processos de Soldagem a Arco**. 1999. 77 f. Dissertação (Mestrado em Metrologia) – Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis.