

UNIVERSIDADE FEDERAL DE SANTA CATARINA
DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA MECÂNICA

Romário Maurício Urbanetto Nogueira

**VARIABILIDADE DO CORDÃO DE SOLDA NOS PROCESSOS
DE SOLDAGEM MIG/MAG E ARAME TUBULAR**

Florianópolis

2015

Romário Maurício Urbanetto Nogueira

**VARIABILIDADE DO CORDÃO DE SOLDA NOS PROCESSOS
DE SOLDAGEM MIG/MAG E ARAME TUBULAR**

Tese submetida ao Programa de Pós-
Graduação em Engenharia Mecânica
para a obtenção do Grau de Doutor em
Engenharia Mecânica.

Orientador: Prof. Carlos Enrique.
Niño, Dr.Eng^o.

Florianópolis

2015

Romário Maurício Urbanetto Nogueira

**VARIABILIDADE DO CORDÃO DE SOLDA NOS PROCESSOS
DE SOLDAGEM MIG/MAG E ARAME TUBULAR**

Esta Tese foi julgada aprovada para a obtenção do Título de
“Doutor em Engenharia Mecânica”, e aprovada em sua forma final pelo
Programa de Pós-Graduação em Engenharia Mecânica.

Florianópolis, 05 de Março de 2015.

Prof. Armando Albertazzi G. Jr. Dr.Eng^o.
Coordenador do Curso

Banca Examinadora:

Prof. Carlos Enrique. Niño, Dr.Eng^o.
Presidente

Prof. Ramón S. Cortés Paredes, Dr.Eng^o.
Relator

Prof. Aleir Antonio Fontana De Paris, Dr Eng^o.

Raul Gohr Júnior, Dr Eng^o.

Prof. Helio Ormeu Ribeiro, Dr Eng^o.

Prof. Régis Henrique Gonçalves e Silva, Dr Eng^o.

DEDICATÓRIAS

Dedico este trabalho a minha família, em especial a minha esposa Cida e a minha mãe, Dona Teca, que tanto torceu e rezou para a finalização deste doutorado.

AGRADECIMENTOS

Ao meu orientador, prof. Carlos E. Niño, pelo constante incentivo e apoio durante a realização do doutorado.

Ao prof. Aleir Fontana De Paris, que gentilmente cedeu seu laboratório para a realização das soldas deste trabalho.

Ao colega prof. Fernando Mariano Bayer pela ajuda no projeto e montagem do sistema de monitoração das soldas semiautomáticas.

Ao amigo Anésio Boger Brand pelo apoio recebido durante a realização do doutorado.

À minha Família, pela paciência e esforço despendido durante todo tempo da realização do doutorado.

A todos os amigos e colegas do CTISM.

A todos os amigos do Labsolda, sem nomeá-los para não esquecer de ninguém.

A todos os bolsistas que ajudaram no transcorrer desta tarefa:
Igor, Diego e Luiz.

Aos soldadores Valtamir Cardoso da Silva e Vinicius Maciel Degliomeni que realizaram as soldas semiautomáticas utilizadas neste trabalho.

A todos aqueles que, direta ou indiretamente, contribuíram para o desenvolvimento deste trabalho.

À UFSC/CTISM, pela possibilidade de realização deste trabalho.

Ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia Mecânica da UFSC.

A CAPES pela concessão da bolsa de doutorado.

RESUMO

A crescente utilização industrial dos processos MIG/MAG e Eletrodo Tubular ocorre porque eles apresentam excelente produtividade devido à sua característica semiautomática decorrente da alimentação contínua do arame eletrodo que também facilita sua automatização. Entretanto, a total automatização apresenta dificuldades práticas e altos custos na aquisição de equipamentos, que muitas vezes é evitada. Assim sendo, com maior frequência os processos MIG/MAG e arame tubular são utilizados de forma semiautomática, em vez de automática. E apesar da similaridade, estes processos apresentam características específicas (não somente a própria forma do arame) que determinam uma variabilidade nas características finais dos cordões inerente a cada processo. Desta maneira interessa conhecer a variabilidade desses processos, isto é, saber como diferentes condições de soldagem afetam as características das soldas obtidas. Especificamente foi estudada a variabilidade na geometria e diluição dos cordões de solda obtidos pelos processos MIG/MAG e arame tubular, utilizando corrente constante e pulsada, em forma automática e semiautomática. Para atingir estes objetivos, foram realizadas soldas de simples deposição sobre chapa de aço carbono ABNT 1020, pelos processos MIG/MAG e arame tubular, utilizando como consumíveis os arames de aço carbono AWS ER70S-6 e AWS E71T-1, respectivamente. Os resultados mostraram que o desvio padrão relativo dos períodos de transferência metálica e dos picos de corrente são parâmetros eficazes e altamente sensíveis para quantificar a estabilidade do arco e que o valor de tensão para máxima estabilidade resulta no menor valor de corrente média (quando mantida a velocidade

do arame), independentemente da velocidade de soldagem e aumenta com a velocidade do arame. Os resultados mostraram ainda que os valores do desvio padrão relativo (utilizado como indicativo da variabilidade) da penetração, convexidade e diluição das soldas realizadas de forma semiautomática foram muito maiores do que nas soldas realizadas de forma automática, Por exemplo, o desvio padrão relativo da penetração da solda realizada de forma semiautomática utilizando arame tubular e transferência por curto-circuito foi 145% e da solda realizada de forma automática foi 20%. Admite-se que estas diferenças ocorram devido a variações na velocidade de soldagem e na distancia bico de contato peça inerentes as solda realizadas de forma semiautomática.

Palavras chave: Soldagem automática; soldagem semiautomática; variabilidade; estabilidade.

ABSTRACT

There is a growing trend toward the use of welding processes capable of greater productivity and easier to automate, such as GMAW and FCAW, replacing the stick electrode and GTAW. However, as full automation presents practical difficulties and higher equipment costs it is often avoided. For that reasons, more frequently GMAW and FCAW are applied in a semi-automatic instead of automatic way. Therefore, it is valuable to understand the variability of these processes, i.e. to know how changes in the welding conditions affect the characteristics of the resulting welds. Variability in geometry and dilution of the weld beads obtained by GMAW and FCAW were specifically studied, using constant and pulsed current, in automatic and semi-automatic way. To achieve these goals, automatic and semi-automatic bead on plate welds were performed on SAE 1020 plates, using GMAW and FCAW processes, with the consumables AWS ER70S-6 solid wire and AWS E71T-1 cored rutile wire, respectively. The results showed that dispersion of the periods of metal transfer and current peaks are effective and highly sensitive parameters to quantify the stability of the arc. The transfer condition with more regularity and/or stability in the short circuit transfer mode depends not only on the reference voltage value but on the inductance as well. The voltage value for maximum stability results in the lowest value of average current (for a certain wire feeding speed), independent of the welding speed and increases the wire feeding speed. The results also showed that dispersion of penetration, convexity and dilution values in welds performed in a semi-automatic way were greater than in automatic welds. For example, the dispersion of penetration in a FCAW weld performed semi automatically by short circuit transfer was 145% and automatic was 20%. It seems that these differences occur due to variations in welding speed and contact to tip distance that are inherent to semiautomatic applications.

Keywords: semiautomatic welding; variability; stability

LISTA DE FIGURAS

- Figura 3. 1-Intensidade da corrente versus velocidade de alimentação de arames de aço carbono de diferentes diâmetros adaptada de (AWS, Welding Handbook: Welding Processes, 1991). 7
- Figura 3. 2 - Taxa de Deposição para tubular e maciço em função do aumento da corrente, Widgery, 1994 apud (GARCIA & SCOTTI, 2011). 9
- Figura 3. 3 - Balanceamento dos efeitos da energia imposta e da sobreposição da poça sobre a penetração para velocidade de soldagem crescente, adaptado de (SCOTTI & PONOMAREV, 2008). 12
- Figura 3. 4 - Gráfico da superfície de resposta da penetração versus corrente e velocidade de soldagem para o processo GMAW-P (SANTOS, 2012). 13
- Figura 3. 5 - Principais funções dos gases de proteção, adaptado de (SUBAN & TUSEK, 2001). 15
- Figura 3. 6 - Influencia do tipo de gás de proteção na geometria do cordão de solda, adaptado de (FARIAS, LUZ, & RODRIGUES, 2002). 17
- Figura 3. 7 - Representação esquemática do *stick-out* e da DBCP. 18
- Figura 3. 8 - Efeito do comprimento do eletrodo e da corrente de soldagem na taxa de fusão, adaptado de (LESNEWICH, 1958). 19
- Figura 3. 9 - Efeito da distância bico de contato peça na corrente e na taxa de deposição Houdcroft e John, 1988apud (GOMES, 2006). 20
- Figura 3. 10 - Regulagem do “efeito indutivo” versus taxas de crescimento da corrente em função da corrente de soldagem (KOBAYASHI, ANASTÁCIO, & NARDINE, 2005). 23

Figura 3. 11 - Efeitos da indutância sobre a área fundida (a) e sobre a penetração(b), adaptada de (SILVA & FERRARESI, 2003). ..	24
Figura 3. 12 - Ilustração do fenômeno de instabilidade da coluna de metal líquido conforme a Teoria da <i>Instabilidade Pinch</i> (SCOTTI & PONOMAREV, 2008).	26
Figura 3. 13 - Mapa de transferência metálica MIG/MAG, Corrente versus Tensão (ZEEMANN, et al).	29
Figura 3. 14 - Mapa de transferência metálica MIG/MAG, Velocidade do Arame versus Tensão (KIM & EAGAR, 1993).	30
Figura 3. 15 - Sequência de imagens em sincronismo com aquisição de sinais de tensão e corrente durante transferência em curto-circuito (LOPERA, et. al., 2011).	31
Figura 3. 16 - Sequência de imagens em sincronismo com aquisição de sinais de tensão e corrente durante transferência globular (LOPERA, et. al., 2011).	32
Figura 3. 17 - Sequência de imagens em sincronismo com aquisição de sinais de tensão e corrente durante transferência goticular projetada (LOPERA, et. al., 2011).	34
Figura 3. 18 - Oscilograma de corrente pulsada, com $I_p = 300$ A, $t_p = 3,9$ ms, $I_b = 50$ A, $t_b = 23$ ms, (MOTTA, 2002).	37
Figura 3. 19 - Índices da transferência metálica por curto-circuito (ROCA, et al., 2005).	40
Figura 3. 20 - Índice de regularidade (W) em função da tensão de soldagem (MITA; SAKABE, & YOKOO, 1988).	42
Figura 3. 21 - Distribuição do DP (MP) e do DP (TMC) em função da tensão média de soldagem (arame ER 70S-6, diâmetro 1 mm, DBCP 15mm, $di/dt = 47$ KA/s), (BAIXO & DUTRA, 1990).	42
Figura 3. 22 - Quantidade de respingos gerada em função da tensão de soldagem (KANG & RHEE, 2001).	44

Figura 3. 23 - Curva de frequência em função de tensão de soldagem para velocidade de alimentação de 2,05 m/min (107 A) e gás de proteção Ar+8CO ₂ , adaptado de (SOUZA, et al., 2011).	45
Figura 3. 24 - Macrografia de solda obtida por simples deposição sobre chapa plana.	46
Figura 3. 25 - Estimativa de diluição a partir da geometria da solda: (a) junta de topo; (b) junta com chanfro em V; (c) depósito sobre chapa.	48
Figura 4. 1 - Regiões de relacionamento entre corrente e tempo de pulso e as respectivas condições de transferência metálica (ALLUM, 1983).	61
Figura 4. 2 - Localização das cinco amostras (seções) retiradas de cada cordão de solda.	64
Figura 4. 3 - Forma de medição dos parâmetros geométricos. ...	65
Figura 4. 4 - Representação esquemática do circuito para monitoração e registro dos deslocamentos da tocha.....	68
Figura 4. 5 - Representação esquemática do sistema para monitoração dos deslocamentos da tocha.	69
Figura 4. 6 – Gabarito para aferição do sistema de medição dos deslocamentos verticais.....	71
Figura 5. 1 - Fotos das soldas dos ensaios de tensão versus “efeito indutivo” com $V_a = 2,4$ m/min.....	77
Figura 5. 2 - Oscilogramas das soldas realizadas com $V_a = 2,4$ m/min, $U_{aj} = 14$ V e “efeito indutivo” 20.....	79

Figura 5. 3 - Oscilogramas das soldas realizadas com $V_a = 2,4$ m/min, $U_{aj} = 14$ V e “efeito indutivo” 50.....	80
Figura 5. 4 - Oscilogramas das soldas realizadas com $V_a = 2,4$ m/min, $U_{aj} = 14$ V e “efeito indutivo” 80.....	81
Figura 5. 5 - Fotos das soldas dos ensaios de tensão versus “efeito indutivo” com $V_a = 3,2$ m/min.	83
Figura 5. 6 - Fotos das soldas dos ensaios de tensão versus “efeito indutivo” com $V_a = 4,3$ m/min.	84
Figura 5. 7 - Corrente Média em função da tensão e do “efeito indutivo”.	85
Figura 5. 8 - Frequência de transferência metálica versus a tensão ajustada, para $V_a = 2,4$ m/min.	87
Figura 5. 9 - Frequência de transferência metálica versus a tensão ajustada, para $V_a = 3,2$ m/min.	88
Figura 5. 10 - Variação da frequência de transferência metálica com a tensão ajustada, para $V_a = 4,3$ m/min.....	88
Figura 5. 11 - Oscilogramas da solda realizada com $V_s = 30$ cm/min, $V_a = 3,2$ m/min, $U_{aj} = 12$ V e DBCP = 12 mm.....	90
Figura 5. 12 - Oscilogramas da solda realizada com $V_s = 30$ m/min, $V_a = 3,2$ m/min, $U_{aj} = 17$ V e DBCP = 12 mm.	91
Figura 5. 13 - Oscilogramas da solda realizada com $V_s = 30$ cm/min, $V_a = 3,2$ m/min, $U_{aj} = 19$ V, DBCP = 12 mm.	92
Figura 5. 14 - Oscilogramas da solda realizada com $V_s = 30$ cm/min, $V_a = 3,2$ m/min, $U_{aj} = 27$ V, e DBCP = 12 mm.....	93
Figura 5. 15 - Oscilogramas da solda realizada com $V_s = 25$ cm/min, $V_a = 2,4$ m/min, $U_{aj} = 22$ V e DBCP = 12 mm.....	96

- Figura 5. 16 - Oscilogramas da solda realizada com $V_s = 30$ cm/min, $V_a = 4,3$ m/min, $U_{aj} = 29$ V, e DBCP = 12 mm. 97
- Figura 5. 17 – Curvas de isoconsumo para o processo MIG/MAG com transferência por curto-circuito e $V_a = 2,4$ m/min. 98
- Figura 5. 18- Curvas de isoconsumo para o processo MIG/MAG com transferência por curto-circuito e $V_a = 3,2$ m/min. 99
- Figura 5. 19 - Curvas de isoconsumo para o processo MIG/MAG com transferência por curto-circuito e $V_a = 4,3$ m/min. 100
- Figura 5. 20 - Oscilogramas da solda realizada com $V_a = 7,5$ m/min e $U_{aj} = 30$ V..... 102
- Figura 5. 21 - Oscilogramas da solda realizada com $V_a = 10,5$ m/min e $U_{aj} = 30$ V..... 103
- Figura 5. 22 - Ensaio realizado com $V_a = 8,5$ m/min e tensão justada 33 V..... 106
- Figura 5. 23 – Curvas de isoconsumo para o processo MIG/MAG e transferência goticular. 107
- Figura 5. 24 – Curvas de isoconsumo para o processo MIG/MAG e transferência pelos modos curto-circuito e goticular..... 108
- Figura 5. 25 - Desvio padrão relativo da penetração das soldas realizadas com diferentes velocidades do arame..... 127
- Figura 5. 26 - Desvio padrão relativo da penetração das soldas realizadas com diferentes correntes médias. 128
- Figura 5. 27 - Desvio padrão relativo da convexidade das soldas realizadas com diferentes velocidades do arame..... 129
- Figura 5. 28 - Desvio padrão relativo da convexidade das soldas realizadas com diferentes correntes médias. 130

Figura 5. 29 - Desvio padrão relativo da diluição das soldas realizadas com diferentes velocidades do arame.....	131
Figura 5. 30 - Desvio padrão relativo da diluição das soldas realizadas com diferentes correntes médias.	132
Figura 5. 31 - Desvio padrão relativo da penetração das soldas realizadas com diferentes DBCPs.	133
Figura 5. 32 - Desvio padrão relativo da convexidade das soldas realizadas com diferentes DBCPs.	134
Figura 5. 33 - Desvio padrão relativo da diluição das soldas realizadas com diferentes DBCPs.	135
Figura 5. 34 - Desvio padrão relativo da penetração das soldas realizadas com diferentes velocidades de soldagem.	136
Figura 5. 35 - Desvio padrão relativo da convexidade das soldas realizadas com diferentes velocidades de soldagem.	137
Figura 5. 36 - Desvio padrão relativo da diluição das soldas realizadas com diferentes velocidades de soldagem.	138
Figura 5. 37 - Variabilidade das soldas realizadas de forma semiautomática, corrente constante e diferentes velocidades do arame.	146
Figura 5. 38 - Variabilidade das soldas realizadas de forma semiautomática, corrente pulsada e dois níveis de corrente de pulso.	148
Figura 5. 39 – Variabilidade da penetração das soldas realizadas de forma automática e semiautomática com transferência por curto-circuito e goticular.	149
Figura 5. 40 - Variabilidade da convexidade das soldas realizadas de forma automática e semiautomática com transferência por curto-circuito e goticular.	150

Figura 5. 41 - Variabilidade da diluição das soldas realizadas de forma automática e semiautomática com transferência por curto-circuito e goticular..... 151

Figura 5. 42 - Variabilidade da penetração das soldas realizadas de forma automática e semiautomática com transferência pelo modo pulsado. 152

Figura 5. 43- Variabilidade da convexidade das soldas realizadas de forma automática e semiautomática com transferência pelo modo pulsado. 153

Figura 5. 44 - Variabilidade da diluição das soldas realizadas de forma automática e semiautomática com transferência pelo modo pulsado. 154

LISTA DE TABELAS

Tabela 3. 1 - Percentagem de curtos-circuitos com transferência metálica (FARIAS, LUZ, & RODRIGUES, 2002).....	16
Tabela 3. 2 - Valores de DBCP empregadas na soldagem com diferentes tipos de arame tubular.	21
Tabela 3. 3 - Regulagem do “efeito indutivo” versus taxas de crescimento da corrente (SILVA & FERRARESI, 2003).....	22
Tabela 3. 4 - Classes e respectivos modos naturais de transferência metálica que acontecem no processo MIG/MAG (SCOTTI & PONOMAREV, 2008).....	28
Tabela 3. 5 - Faixas de corrente de transição para diferentes materiais e diâmetros de arame, utilizando diferentes misturas como gás de proteção (SCOTTI & PONOMAREV, 2008).	35
Tabela 3. 6 - Faixa de diluição de alguns processos de soldagem a arco (FBTS, 2010).	49
Tabela 4. 1 – Corpos de prova, metais de adição e parâmetros fixos.	51
Tabela 4. 2- Características elétricas da fonte da IMC modelo DIGIPLUS A7 (450).....	52
Tabela 4. 3- Característica metrológicas do SAP.....	53
Tabela 5. 1 - Velocidade de arame versus corrente e tensão médias, com tensão ajustada em 18 V.	74
Tabela 5. 2 - Velocidade de arame versus corrente e tensão médias, com tensão ajustada em 20 V.	75
Tabela 5. 3- Velocidade de arame versus tensão ajustada e “efeito indutivo”.	76

Tabela 5. 4 – Variabilidade das soldas realizadas com $V_a = 2,4$ m/min, $U_{aj} = 18$ V.	78
Tabela 5. 5 - Variabilidade das soldas dos ensaios de tensão versus “efeito indutivo” com $V_a = 2,4$ m/min.....	82
Tabela 5. 6 - Variabilidade das soldas dos ensaios de tensão versus “efeito indutivo” com $V_a = 3,2$ m/min.....	83
Tabela 5. 7 - Variabilidade das soldas realizadas nos ensaios de tensão versus “efeito indutivo” com $V_a = 4,3$ m/min.	84
Tabela 5. 8 - Velocidade de arame versus corrente e tensão médias.	101
Tabela 5. 9 - Ensaio de isoconsumo com velocidade de arame de 8,5 m/min.	104
Tabela 5. 10 - Ensaio de isoconsumo com velocidade de arame de 9,5 m/min.....	105
Tabela 5. 11 - Ensaio de isoconsumo com velocidade de arame de 10 m/min.....	105
Tabela 5. 12 - Valores das variáveis para soldar utilizando corrente pulsada e processo MIG/MAG.....	109
Tabela 5. 13 - Valores das variáveis para soldar utilizando corrente pulsada e processo Arame Tubular.	109
Tabela 5. 14 - Valores das variáveis das soldas realizadas de modo automático com o processo MIG/MAG e diferentes velocidades de arame (V_a).....	112
Tabela 5. 15 - Valores das variáveis das soldas realizadas de modo automático com o processo MIG/MAG e diferentes correntes médias (I_m).	112

Tabela 5. 16 - Valores das variáveis das soldas realizadas de modo automático com o processo MIG/MAG, corrente constante com diferentes DBCPs..... 113

Tabela 5. 17 - Valores das variáveis das soldas realizadas de modo automático com o processo MIG/MAG, corrente pulsada com diferentes DBCPs..... 113

Tabela 5. 18 - Valores das variáveis das soldas realizadas de modo automático com o processo MIG/MAG, corrente constante e diferentes velocidades de soldagem (V_s)..... 114

Tabela 5. 19 - Valores das variáveis das soldas realizadas de modo automático com o processo MIG/MAG, corrente pulsada e diferentes velocidades de soldagem (V_s)..... 114

Tabela 5. 20 - Valores das variáveis das soldas realizadas de modo automático com o processo arame tubular e diferentes velocidades de arame (V_a)..... 116

Tabela 5. 21 - Valores das variáveis das soldas realizadas de modo automático com o processo arame tubular com diferentes correntes médias (I_m). 116

Tabela 5. 22 - Valores das variáveis das soldas realizadas de modo automático com o processo arame tubular, corrente constante com diferentes DBCPs..... 116

Tabela 5. 23 - Valores das variáveis das soldas realizadas de modo automático com o processo arame tubular, corrente pulsada com diferentes DBCPs..... 117

Tabela 5. 24 - Valores das variáveis das soldas realizadas de modo automático com o processo arame tubular, tensão constante com diferentes velocidades de soldagem (V_s)..... 117

Tabela 5. 25 - Valores das variáveis das soldas realizadas de modo automático com o processo arame tubular, corrente pulsada com diferentes velocidades de soldagem (V_s)..... 117

Tabela 5. 26 - Respostas das soldas realizadas de modo automático, processo MIG/MAG, transferência por curto-circuito e diferentes velocidades do arame (Va). 119

Tabela 5. 27 - Variabilidade das soldas realizadas de modo automático com transferência por curto-circuito e diferentes velocidades do arame (Va)..... 120

Tabela 5. 28 - Variabilidade das soldas realizadas de modo automático com o processo MIG/MAG e diferentes velocidades de arame (Va)..... 121

Tabela 5. 29 - Variabilidade das soldas realizadas de modo automático com o processo MIG/MAG e diferentes correntes médias (Im)..... 122

Tabela 5. 30 - Variabilidade das soldas realizadas de modo automático com o processo MIG/MAG, corrente constante e diferentes distâncias bico de contato peça (DBCP). 122

Tabela 5. 31 - Variabilidade das soldas realizadas de modo automático com o processo MIG/MAG, corrente pulsada e diferentes distâncias bico de contato peça (DBCP). 123

Tabela 5. 32 - Variabilidade das soldas realizadas de modo automático com o processo MIG/MAG, corrente constante e diferentes velocidades de soldagem (Vs)..... 123

Tabela 5. 33 - Variabilidade das soldas realizadas de modo automático com o processo MIG/MAG, corrente pulsada e diferentes velocidades de soldagem (Vs)..... 123

Tabela 5. 34 - Variabilidade das soldas realizadas de modo automático com o processo arame tubular e diferentes velocidades de arame (Va)..... 124

Tabela 5. 35 - Variabilidade das soldas realizadas de modo automático com o processo arame tubular com diferentes correntes médias (Im). 124

Tabela 5. 36 - Variabilidade das soldas realizadas de modo automático com o processo arame tubular, corrente constante e diferentes distâncias bico de contato peça (DBCP). 125

Tabela 5. 37 - Variabilidade das soldas realizadas de modo automático com o processo arame tubular, corrente pulsada e diferentes distâncias bico de contato peça (DBCP). 125

Tabela 5. 38 - Variabilidade das soldas realizadas de modo automático com arame tubular, corrente constante e diferentes velocidades de soldagem (Vs)..... 125

Tabela 5. 39 - Variabilidade das soldas realizadas de modo automático com arame tubular, corrente pulsada e diferentes velocidades de soldagem (Vs). 126

Tabela 5. 40 - Valores das variáveis das soldas realizadas de modo semiautomático e corrente constante. 139

Tabela 5. 41 - Valores das variáveis das soldas realizadas de modo semiautomático e corrente pulsada. 139

Tabela 5. 42 - Valor médio, desvio padrão e desvio padrão relativo das velocidades de soldagem das soldas realizadas de forma semiautomática. 140

Tabela 5. 43 - Valor médio, desvio padrão e desvio padrão relativo da DBCP das soldas realizadas de forma semiautomática. 140

Tabela 5. 44 – Respostas das soldas realizadas de modo semiautomático e corrente constante. 141

Tabela 5. 45 - Respostas das soldas modo semiautomático e corrente pulsada. 142

Tabela 5. 46 - Determinação da variabilidade das soldas realizadas de modo semiautomático e corrente constante..... 143

Tabela 5.47 - Determinação da variabilidade das soldas realizadas de modo semiautomático e corrente pulsada. 144

Tabela 5. 48 - Variabilidade das soldas realizadas de modo semiautomático e corrente constante..... 145

Tabela 5. 49 - Variabilidade das soldas realizadas de modo semiautomático e corrente pulsada..... 145

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

- ABNT - Associação Brasileira de Normas Técnicas
- AWS - American Welding Society
- DBCP - Distancia Bico de Contato Peça
- DP MP - Desvio padrão relativo da média dos picos de corrente
- DP TMC - Desvio padrão relativo dos tempos médios de curto-circuito
- DPR - Desvio padrão relativo (%)
- FCAW - Flux Cored Arc Welding (soldagem com arame tubular autoprottegido)
- GMAW - Gas Metal Arc Welding (Solda MIG/MAG)
- GMAW-P - Gas Metal Arc Welding Pulsed (Solda MIG/MAG Pulsada)
- MB - Metal Base
- MIG/MAG - Metal Inert Gas / Metal Active Gas
- MR - Melting rate of the electrode (taxa de fusão do eletrodo)
- PO - Potencial de Oxidação (eV)
- SMAW - Shielded Metal Arc Welding (Solda com eletrodo revestido)
- TIG - Tungsten Inert Gas
- TWI - The Welding Institute
- ZAC - Zona Afetada pelo Calor
- ZF- Zona Fundida
- ZTA - Zona Termicamente Afetada
- GTAW - Gas Tungsten Arc Welding (soldagem TIG)
- SAP - Sistema de Aquisição Portátil (de dados de soldagem)
- IIW - International Institute of Welding
- UFSC - Universidade Federal de Santa Catarina

UFSM / CTISM - Universidade Federal de Santa Maria / Colégio
Técnico Industrial de Santa Maria
IHM - Interface homem máquina

LISTA DE SÍMBOLOS

- Af - Área fundida do cordão de solda (mm^2)
- Ap - Área de penetração do cordão de solda (mm^2)
- Ar - Área de reforço do cordão de solda (mm^2)
- C - Índice de convexidade da solda
- CC+ - Polaridade Direta
- D - Diluição
- de - Diâmetro do eletrodo (mm)
- dg - Diâmetro da gota (mm)
- di/dt - Taxas de subida e descida da corrente (A/ms)
- Fcc - Frequência de curto-circuito (Hz)
- I - Corrente elétrica (A);
- Iab - Corrente do arco aberto (A)
- Ib - Corrente de base (A)
- Ic - Corrente de transição (A)
- Icc - Corrente de curto-circuito (A)
- Im - Corrente média (A)
- Im - corrente média (A)
- Ip - Corrente de pulso (A)
- K - Constante que relaciona a velocidade de alimentação do arame com a corrente média de soldagem
- Kd - Indica a taxa de descida da corrente nas fontes de soldagem IMC e têm uma relação com o inverso da indutância ($K_d = 0,0036/L_d$)
- Ks - Indica a taxa de subida da corrente nas fontes de soldagem IMC e têm uma relação com o inverso da indutância ($K_s = 0,0036/L_s$)
- L - Largura do cordão de solda (mm)
- la - Comprimento do arco (mm)

- P - Penetração do cordão de solda (mm)
- R - Reforço do cordão de solda (mm)
- S - Extensão livre do eletrodo (mm)
- T - Período de transferência das gotas (ms)
- tab - Tempo que o arco permanece aberto (ms)
- tb - Tempo de base (ms)
- tcc - Tempo de duração do curto-circuito (ms)
- TF - Taxa de fusão do eletrodo (kg/h)
- tp - Tempo de pulso (ms)
- U - Tensão elétrica (V)
- Uab - Tensão do arco aberto (V)
- Uaj - Tensão ajustada na fonte de soldagem (V)
- Um - Tensão média (V)
- Va - Velocidade do arame (m/min)
- Vs - Velocidade de soldagem (cm/min)
- W - Wire feed speed (Velocidade do arame)
- α - Constante relacionada ao calor gerado pelo arco e à polaridade (kg/A. h)
- β - Constante dependente da resistividade e do diâmetro do arame (kg/mm. A². H)
- ΔU - Variação da tensão (V)

SUMÁRIO

1- INTRODUÇÃO	1
2- OBJETIVOS	3
3- REVISÃO BIBLIOGRÁFICA	5
3.1- VARIÁVEIS DE ENTRADA DOS PROCESSOS	5
3.1.1- Corrente de Soldagem	5
3.1.2- Tensão do Arco Elétrico	9
3.1.3- Velocidade de Soldagem.....	11
3.1.4- Gás de Proteção	13
3.1.5- Extensão Livre do Eletrodo e DBCP.....	18
3.1.6- Indutância.....	21
3.2- CARACTERÍSTICAS DE SAÍDA DOS PROCESSOS	24
3.2.1- Transferência Metálica	25
3.2.2- Tipos de Transferência Metálica	27
3.2.3- Técnicas para Identificar o tipo de Transferência Metálica .	38
3.2.4- Estabilidade do Processo	39
3.2.5- Zonas de um Cordão de Solda e a Diluição	46
3.3- MEDIDAS DE VARIABILIDADE	49
4- PROCEDIMENTO EXPERIMENTAL	51
4.1- EQUIPAMENTOS E ACESSÓRIOS	52

4.1.1- Fonte de Soldagem	52
4.1.2- Sistema de deslocamento da tocha.....	53
4.1.3- Sistema de Aquisição de Dados.....	53
4.2- PLANEJAMENTO EXPERIMENTAL	54
4.2.1- Parâmetros de Transferência Estável	54
4.2.2- Variabilidade em soldas Automáticas	63
4.2.3- Variabilidade em soldas Semiautomáticas.....	66
5- RESULTADOS E DISCUSSÕES	73
5.1- PARÂMETROS PARA TRANSFERÊNCIA ESTÁVEL.....	73
5.1.1- Parâmetros de Transferência Estável por Curto-Circuito....	73
5.1.2- Parâmetros de Transferência Estável pelo modo Goticular	100
5.1.3- Parâmetros de Transferência por Corrente Pulsada.....	109
5.2- VARIABILIDADE EM SOLDAS AUTOMÁTICAS.....	110
5.3- RESPOSTAS DAS SOLDAS AUTOMÁTICAS	118
5.4- COMPARAÇÃO DA VARIABILIDADE DAS SOLDAS AUTOMÁTICAS	126
5.5- VARIABILIDADE EM SOLDAS SEMIAUTOMÁTICAS.	138
5.6- DISTÂNCIA BICO DE CONTATO PEÇA E VELOCIDADE DE SOLDAGEM EM SOLDAS SEMIAUTOMÁTICAS	139
5.7- RESPOSTAS DAS SOLDAS SEMIAUTOMÁTICAS	141

5.8- COMPARAÇÃO DA VARIABILIDADE DAS SOLDAS SEMIAUTOMÁTICAS.....	146
5.9- COMPARAÇÃO DA VARIABILIDADE DAS SOLDAS AUTOMÁTICAS E SEMIAUTOMÁTICAS	148
6- CONCLUSÕES.....	155
6.1- CONCLUSÕES GERAIS:.....	155
6.2- CONCLUSÕES QUANTO À VARIABILIDADE NAS SOLDAS AUTOMÁTICAS:.....	156
6.3- CONCLUSÕES QUANTO À VARIABILIDADE NAS SOLDAS SEMIAUTOMÁTICAS:	157
6.4- CONCLUSÕES QUANTO À VARIABILIDADE DAS SOLDAS SEMIAUTOMÁTICAS VERSUS AUTOMÁTICAS:	157
7- PROPOSTAS PARA TRABALHOS FUTUROS	159
8- BIBLIOGRAFIA	161
9- APÊNDICES	169
9.1- APÊNDICE A - Cálculo dos valores das variáveis de transferência com corrente pulsada para o processo MIG/MAG.	169
9.2- APÊNDICE B - Cálculo dos valores das variáveis de transferência com corrente pulsada para o processo arame tubular.	170
9.3- APÊNDICE C - Frequências de transferências metálicas.	171

1- INTRODUÇÃO

Os processos eletrodo revestido e TIG, que são tipicamente aplicados em forma manual, vêm gradativamente sendo substituídos pelos processos MIG/MAG e arame tubular, em muitas aplicações nas indústrias automobilística, naval e do petróleo. Essa substituição se justifica pela elevada produtividade, alto fator de carga e facilidade para serem automatizados, em função da alimentação contínua do arame eletrodo.

O processo arame tubular, comparado com o MIG/MAG, tem como vantagem a capacidade de trabalhar com ligas de adição de difícil conformabilidade, como é o caso de ligas que perdem ductilidade quando trefiladas, seja devido ao encruamento ou a transformações de fase induzidas por deformação. Assim sendo, revestimentos resistentes à cavitação ou ao desgaste que tradicionalmente eram obtidos pelo processo eletrodo revestidos, hoje em dia podem ser obtido pelo processo arame tubular, com os mencionados ganhos em produtividade e automatização. Esta última tem um efeito benéfico sobre a repetibilidade, pois diminui a influência da habilidade e desempenho do soldador sobre as características da solda. No caso de revestimentos, uma característica importante é a diluição, pois dela depende a composição do metal de solda e, portanto, sua microestrutura e propriedades.

Entretanto, a total automatização dos processos MIG/MAG e arame tubular, incluindo sistemas de seguimento de junta e até controles

adaptativos, muitas vezes são evitados, devido ao custo dos equipamentos e às dificuldades para estabelecer condições de soldagem que resultem em procedimentos suficientemente robustos.

Nos inúmeros estudos disponíveis na literatura sobre o estabelecimento das condições de soldagem ótimas para aplicações específicas, de união ou de revestimento, verificam-se problemas para correlacionar as variáveis de processo com as características da solda, tais como a geometria e a diluição do cordão. Os problemas parecem ser causados por uma inerente variabilidade dos processos, que dificulta obter um procedimento de soldagem robusto, mesmo quando este é aplicado em forma automática.

Na aplicação semiautomática, as variações relacionadas com a manipulação da pistola, notadamente a velocidade de soldagem e a distância entre o bico de contato e a peça, causam um aumento da variabilidade que não tem sido adequadamente documentado na literatura.

Portanto, justifica-se o presente trabalho, que visa determinar os aspectos de variabilidade dos processos MIG/MAG e arame tubular para, com base neles, poder definir procedimentos de soldagem mais robustos, tanto em aplicações automáticas quanto semiautomáticas.

2- OBJETIVOS

O presente trabalho tem como objetivo geral o de determinar a variabilidade dos processos MIG/MAG e arame tubular, de modo a se obter procedimentos e condições para garantir uma repetibilidade e robustez na aplicação automática e semiautomática dos mesmos, com a finalidade de produzir revestimentos mais homogêneos.

Para atender a este objetivo geral, foram definidos como objetivos específicos:

- Determinar como diferentes condições de soldagem nos processos MIG/MAG e arame tubular, utilizando corrente constante e corrente pulsada afetam a geometria e diluição do cordão de solda.
- Determinar como variações que podem ser esperadas na aplicação semiautomática dos processos MIG/MAG e Arame Tubular, notadamente na velocidade de soldagem e na distância entre bico de contato e a peça, afetam a geometria e a diluição dos cordões de solda.

3- REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

Este capítulo traz inicialmente um levantamento sobre as principais variáveis de entrada dos processos MIG/MAG e arame tubular, ou seja, a corrente de soldagem, a tensão do arco elétrico, a extensão livre do eletrodo, a indutância, o tipo gás de proteção e a velocidade de soldagem indicando seus parâmetros e sua influência sobre as características de saída destes processos. Após aborda os tipos de transferência metálica e as técnicas utilizadas para identifica-las, a estabilidade e os critérios de estabilidade para os diferentes modos de transferência metálica dos processos MIG/MAG e arame tubular. Este capítulo traz ainda uma descrição sobre as zonas de um cordão de solda e a diluição e termina com uma breve descrição sobre medidas de variabilidade.

3.1- VARIÁVEIS DE ENTRADA DOS PROCESSOS

3.1.1- Corrente de Soldagem

No processo MIG/MAG a intensidade da corrente engloba valores na faixa dos 30A até valores superiores a 600A, e tem influência direta na taxa de fusão, no modo de transferência metálica e nas características geométricas do cordão. Sendo assim, sua regulação vai depender da espessura das peças a serem unidas ou revestidas e das características desejadas dos cordões de solda. A relação entre a Taxa de Fusão (TF) e a corrente (que é um parâmetro que rege o processo MIG/MAG) foi modelada por Lesnewich (LESNEWICH, 1958) que propôs a equação empírica (2.1) mostrada a seguir, composta por dois

termos onde o primeiro tem relação com o calor transferido do arco para a ponta do eletrodo e o segundo com o calor gerado por efeito Joule ao longo da extensão livre do eletrodo.

$$TF = \alpha \cdot I + \beta \cdot s \cdot I^2 \quad (2. 1)$$

Onde:

TF: Taxa de fusão (kg/h);

α : Constante relacionada ao calor gerado pelo arco e à polaridade (kg/A. h);

β : Constante dependente da resistividade e do diâmetro do arame (kg/mm. A². h);

I: Corrente (A);

S: Extensão livre do eletrodo (mm).

Uma condição essencial para que ocorra estabilidade na soldagem pelo processo MIG/MAG é o estabelecimento de um equilíbrio entre a Taxa de Fusão do eletrodo (TF) ou “Melting rate of the electrode” (MR) e a Velocidade de alimentação do arame (Va) ou “Wire feed speed” (w), (STENBAKCA & PERSSON, 1989). Para o processo MIG/MAG mantidas fixas as demais variáveis, o aumento na corrente determina aumento na taxa de fusão do metal de adição e na penetração da solda. A corrente também tem influencia sobre o tamanho da gota e a frequência de destacamento da mesma, pois à medida que a corrente cresce diminui o volume da gota e aumenta a taxa de transferência. Quando a corrente atinge o nível de transição globular/goticular ocorre um abrupto aumento da taxa de transferência e da diminuição do volume da gota, caracterizando assim a transferência goticular ou por *spray*. A corrente de transição é dependente da tensão superficial do metal líquido, do diâmetro do eletrodo, da temperatura de fusão do metal de

adição e da composição do gás de proteção (AWS, Welding Handbook: Welding Processes, 1991). No processo MIG/MAG convencional (fonte com característica estática de tensão constante) para um comprimento livre do eletrodo constante a intensidade da corrente de soldagem está diretamente relacionada com a velocidade de alimentação do arame e com o diâmetro do eletrodo. Assim, como indica a Figura 3. 1, para um mesmo diâmetro do eletrodo o aumento da velocidade de arame determina um aumento da corrente de soldagem e da taxa de fusão. Da mesma maneira, para a uma dada velocidade de arame a redução do diâmetro do eletrodo determina uma redução da corrente de soldagem, mantendo-se a taxa de fusão, pois quanto menor o diâmetro do eletrodo maior a resistência e maior a parcela de calor produzida pelo efeito joule.

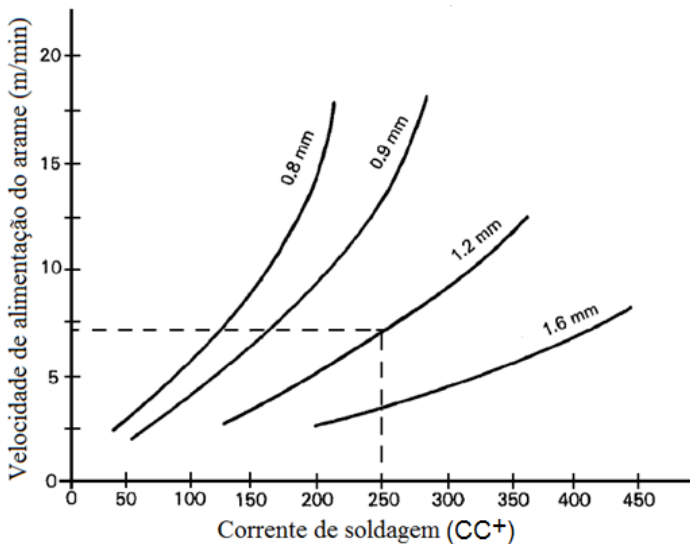


Figura 3. 1-Intensidade da corrente versus velocidade de alimentação de arames de aço carbono de diferentes diâmetros adaptada de (AWS, Welding Handbook: Welding Processes, 1991).

Resultados de diversos trabalhos desenvolvidos por Starling (STARLING & MODENESI, 2004), (STARLING & MODENESI, 2005), (STARLING & MODENESI, 2005) (1) e (STARLING & MODENESI, 2007) sugerem que de uma maneira geral o modelo clássico para a velocidade de fusão (equação 2.1) é capaz de descrever satisfatoriamente a fusão dos arames tubulares na soldagem com o eletrodo na polaridade positiva ou negativa. Conforme Starling (STARLING & MODENESI, 2007) os coeficientes α e β podem assumir diferentes valores dependendo das características particulares de cada arame tubular (por exemplo, geometria, composição química da fita e do fluxo) e também, em maior ou menor grau, das condições operacionais (por exemplo, composição do gás de proteção). Dessa forma, para uma mesma velocidade de alimentação do arame (mantendo-se fixas as demais condições operacionais) é de se esperar que a soldagem com os diferentes arames tubulares resulte, por exemplo, em diferentes correntes de soldagem. Segundo Widgery, 1994 apud (GARCIA & SCOTTI, 2011) à medida que se trabalha com uma corrente de soldagem maior (em fontes convencionais) as taxas de deposição com arames tubulares aumentam e o arame tubular do tipo “metal cored” e o processo MIG/MAG mostram comportamentos bem similares como indica a Figura 3. 2. Na soldagem com o processo MIG/MAG, toda a seção transversal do arame conduz corrente, enquanto que para o arame tubular a corrente é conduzida pela fita metálica que envolve o fluxo, resultando então em maior densidade de corrente e maior ação do efeito Joule sobre a taxa de fusão. Fato que concorda com os resultados de Starling (STARLING & MODENESI, Comparação do Desempenho Operacional e das Características do Cordão na Soldagem com

Diferentes Arames Tubulares, 2009) que ao utilizar o mesmo gás de proteção e mesma velocidade de alimentação obteve corrente média maior para o “metal cored” do que para os arames tubulares com fluxo.

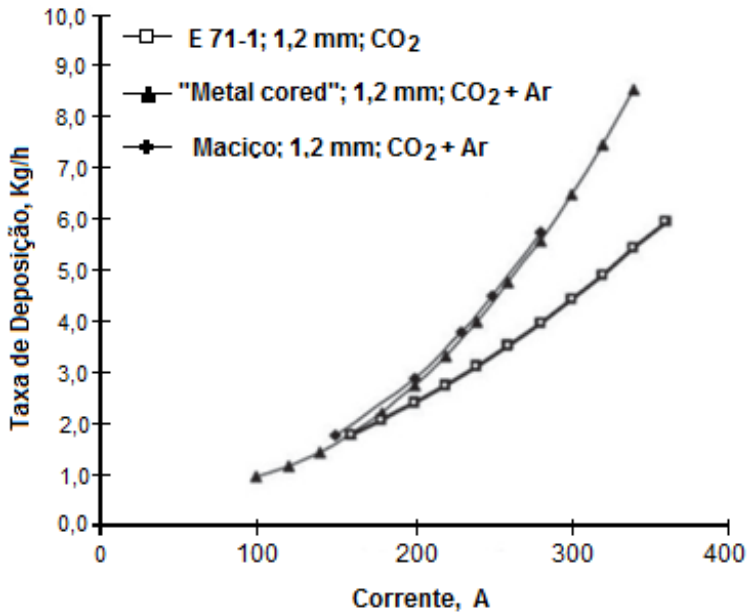


Figura 3. 2 - Taxa de Deposição para tubular e maciço em função do aumento da corrente, Widgery, 1994 apud (GARCIA & SCOTTI, 2011).

3.1.2- Tensão do Arco Elétrico

A tensão é considerada um dos parâmetros mais influentes nos processos MIG/MAG e arame tubular por afetarem tanto o modo de transferência metálica quanto a geometria do cordão de solda. Além disto, para que exista a passagem de corrente é necessário que exista diferença de potencial elétrico suficiente entre o eletrodo e a peça. Assim, para uma determinada velocidade de alimentação do arame caso a tensão ajustada seja insuficiente (determinando uma baixa intensidade

de corrente) durante a soldagem o arame irá se chocar contra a peça sem que ocorra a sua fusão (fenômeno conhecido como *stutting*). No extremo oposto, caso a tensão seja muito elevada para a velocidade de alimentação do arame ajustada a fusão pode ocorrer com velocidade maior que a de alimentação, provocando a fusão do arame no bico de contato (*burn-back*). Portanto, a taxa de fusão é dependente não só da velocidade de alimentação do arame, mas também da tensão de referência ajustada na fonte de soldagem. A tensão e o comprimento do arco estão diretamente relacionados, de modo que, baixas tensões tenderão a produzir pequenos comprimentos de arco e vice-versa.

O comprimento do arco também sofre a influência de outras variáveis, como a composição e o diâmetro do eletrodo, o tipo de gás de proteção utilizado e o modo de transferência. Alterações permanentes do comprimento do arco são obtidas ajustando-se a tensão de saída da fonte e a velocidade de Alimentação do Arame. A tensão do arco e o seu comprimento podem afetar a aparência e a penetração do cordão de solda. Comprimentos de arco excessivos causam muitos respingos e irregularidades na morfologia do cordão. Em tensões baixas (arco mais curto) a área de contato entre o arco e o metal base será menor e a poça receberá menos calor provindo do arco aumentando a tensão superficial da poça de fusão, originando cordão convexo com pequena penetração e largura.

Conforme a literatura consultada no processo MIG/MAG as tensões variam na faixa dos 15 aos 35 V e um arco autocorrigido e estável é obtido com o uso de uma fonte convencional (característica estática do tipo tensão constante) com um alimentador de arame de velocidade constante. Para o processo arame tubular a literatura mostra

a utilização de faixa de tensões próximas as do processo com o processo MIG/MAG, como por exemplo, no trabalho realizado por Luz (LUZ, FARIAS, & FERRARESI, 2005) que empregou velocidades de alimentação de arame de 1,5 a 12,5 m/min associadas a tensões de referência de 18 a 32 V ou no trabalho de Rodrigues (RODRIGUES, PAIVA, & COSTA, 2007) que utilizou arame AWS E71-1 com diâmetro 1,2 mm e tensões na faixa de 26,6 a 38,4V associadas a velocidades de arame entre 8,6 e 15,4 m/min ou ainda o trabalho de Lima (LIMA & FERRARESI, 2006) que estudou os modos de transferência metálica de um arame tubular auto protegido com variação da distância bico de contato, com tensões na faixa de 18 a 50 V associadas a velocidades de arame entre 3 e 17 m/min.

3.1.3- Velocidade de Soldagem

A velocidade de soldagem, definida como a velocidade de deslocamento do arco ao longo da junta, influencia o aporte térmico, pois, quanto maior a velocidade, menor a quantidade de calor cedida à peça por unidade de comprimento. Ao controlar a velocidade de soldagem, pode-se controlar a penetração e a área do cordão, porém, uma velocidade de soldagem muito alta aumenta a tendência a mordeduras, extinção do arco e trincas. Já velocidades muito baixas, além de elevarem o custo da operação, aumentam o grau das alterações metalúrgicas na estrutura do material devido aos longos tempos de exposição a altas temperaturas (por exemplo, maior é o tamanho de grão na zona afetada pelo calor). Segundo a literatura sobre soldagem pelos processos a arco elétrico a penetração do cordão de solda é diretamente

proporcional a corrente e inversamente proporcional à velocidade de soldagem. Ou seja, a penetração da solda é maior para velocidades menores de avanço e diminui com o aumento da velocidade, assim como a largura do cordão e a altura do reforço. Porém como chama atenção Scotti (SCOTTI & PONOMAREV, 2008) esta informação não é verdadeira quando se trata do processo MIG/MAG. Neste processo existe uma peculiaridade, como ilustra a Figura 3. 3, o comportamento da penetração em função da velocidade se caracteriza por uma curva com um ponto de máximo.

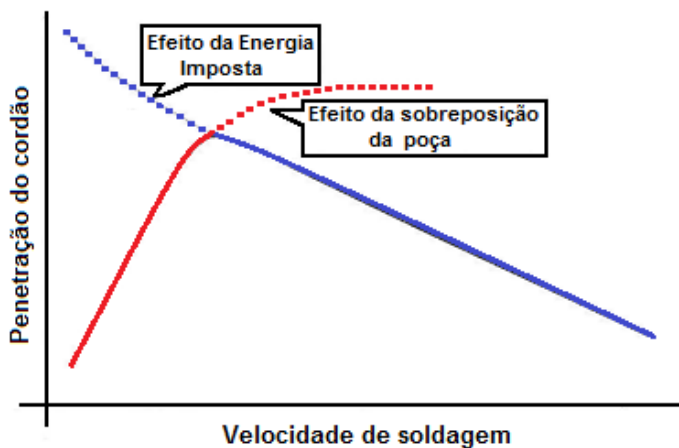


Figura 3. 3 - Balanceamento dos efeitos da energia imposta e da sobreposição da poça sobre a penetração para velocidade de soldagem crescente, adaptado de (SCOTTI & PONOMAREV, 2008).

Isto ocorre porque inicialmente com o crescimento da velocidade de soldagem a sobre posição da poça se torna menor e a tendência é um aumento na penetração, de outra parte, em velocidades de soldagem ainda mais elevadas, menor é o calor aportado por unidade de comprimento da solda diminuindo a penetração para a mesma condição

de corrente e tensão. Ou seja, para baixas velocidades de soldagem o efeito da sobreposição da poça prevalece e para velocidades elevadas o efeito do aporte calor se torna o principal. Esta peculiaridade foi relatada por Miranda (MIRANDA, 1999) e também por Santos (SANTOS, 2012), que ao realizar soldas pelo processo MIG/MAG constatou que para um mesmo nível de corrente a penetração primeiro aumentou e depois diminuiu com o aumento da velocidade de soldagem (vide Figura 3.4).

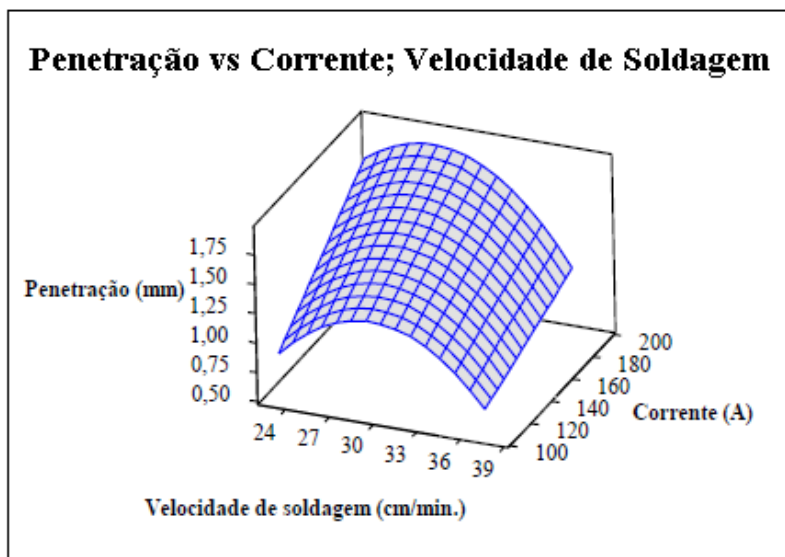


Figura 3.4 - Gráfico da superfície de resposta da penetração versus corrente e velocidade de soldagem para o processo GMAW-P (SANTOS, 2012).

3.1.4- Gás de Proteção

São gases puros ou misturas de gases injetadas na região da soldagem com a finalidade de proteger a poça e a gota em transferência. Além de proteger, estes gases também têm influência na estabilidade do

arco, no modo de transferência metálica, na geometria, nas propriedades mecânicas e nas características metalúrgicas do cordão de solda, como ilustra a Figura 3. 5 que indica os principais efeitos dos gases de proteção em uma soldagem MIG/MAG. Segundo Moyer (MOYER, 2001) a adição de O₂ (1 a 5) ou CO₂ (3 a 25) aumenta a produtividade e a qualidade do cordão de solda e Jönsson (JÖNSSON, MURPHY, & SZEKELY, 1995) destaca que a adição de oxigênio ou dióxido de carbono no gás de proteção, para a soldagem dos aços melhora a molhabilidade da poça de fusão sobre o metal de base, pois quando o oxigênio está presente no gás de proteção ocorre a formação de um filme de óxido de silício (SiO₂) na poça de fusão que apresenta um baixo valor de tensão superficial (0,2 a 0,26 N/m²) comparado com a dos aços (1,7 a 1,9 N/m²). Conforme Smith, 1978 apud (STENBAKCA & PERSSON, 1989) e Onsoien (ONSOIEN, LIU, & OLSON, 1996), o efeito desses gases é desigual, ou seja, o potencial de oxidação (PO) varia com a porcentagem volumétrica dos mesmos na mistura gasosa.

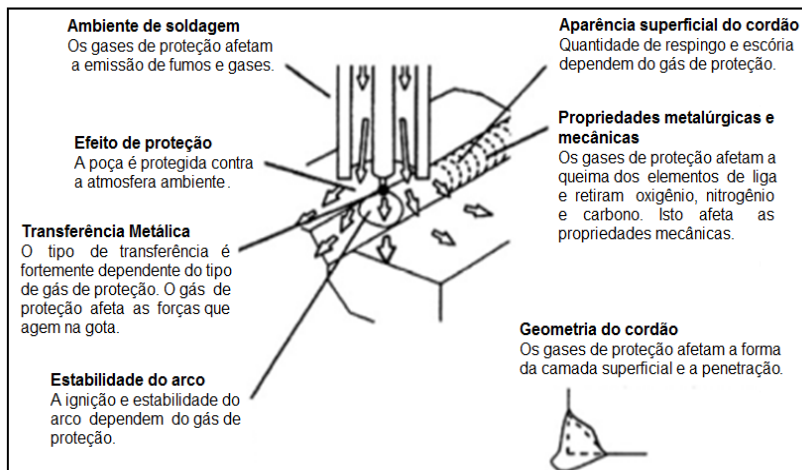


Figura 3. 5 - Principais funções dos gases de proteção, adaptado de (SUBAN & TUSEK, 2001).

O potencial de oxidação tem influência sobre diversos aspectos da solda incluindo, por exemplo, a fluidez da poça de fusão, volume de fumos, tenacidade e resistência mecânica do metal de solda. Fórmulas empíricas têm sido desenvolvidas, na tentativa de relacionar o PO com o oxigênio no metal de solda, sendo que o International Institute of Welding (IIW) apresenta a seguinte relação, que se aplica para um valor máximo de 12,5 de O_2 e de 25 de CO_2 .

$$PO = O_2 + (CO_2 / 2) \quad (2.2)$$

Onde Potencial de Oxidação (PO) em elétron volts (eV).

Na expressão (2.2) observa-se que o potencial de oxidação do CO_2 nas misturas gasosas corresponde à metade do potencial de oxidação do O_2 , justificando a formação de misturas comerciais de argônio com baixos teores de O_2 em relação ao CO_2 . Com adições de oxigênio limitadas em 5 para minimizar os problemas como perda de

elementos de liga e a deterioração das propriedades mecânicas, e garantir seus benefícios operacionais (LYTTLE & STAPON, 1990). Estudos mostram que o aumento do teor de CO₂ no gás de proteção determina uma maior instabilidade do arco e um maior nível de respingos além de aumentar a penetração nas soldas realizadas com arames tubulares (STENBACK, 1990). Esta instabilidade poderá estar associada a mudanças na frequência e nos tempos de curtos-circuitos.

A fim de avaliar estabilidade do arco ao realizar soldas com Arame tubular AWS E71T-1, Farias (FARIAS, LUZ, & RODRIGUES, 2002) adotou como índices a frequência (F_{cc}) e o tempo (t_{cc}) de curto-circuito e utilizou uma fonte convencional com dois tipos de gás de proteção o CO₂ puro e uma mistura de Ar (75) e CO₂ (25). Como mostra a Tabela 3. 1 a soldagem com o CO₂ puro provocou um aumento considerável na percentagem de curtos-circuitos com transferência metálica (Farias considerou curtos-circuitos com transferência metálica somente aqueles com duração superior a 2,0 ms).

Tabela 3. 1 - Percentagem de curtos-circuitos com transferência metálica (FARIAS, LUZ, & RODRIGUES, 2002).

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

A mudança do CO₂ puro para a mistura de CO₂ e argônio reduz o tempo médio de curtos-circuitos, essa redução proporciona uma melhoria na estabilidade do arco visto que esse menor tempo de curto-circuito induz a um menor tempo de arco apagado (FARIAS, LUZ, & RODRIGUES, 2002). O tipo de gás também influi na formação do arco

voltaico gerando mudanças na geometria do cordão, o arco gerado com CO₂ puro tende a ser mais constricto, diminuindo a largura do cordão e aumentando o seu reforço. A maior constrição do arco, para o CO₂, provoca também uma maior pressão do arco sobre a poça de fusão, o que causará uma maior penetração. A solda com Ar + CO₂, por sua vez, tende a apresentar uma maior largura e um menor reforço, pois o arco gerado por esse tipo de gás incide numa área maior do metal de base (MIRANDA, 1999). Estes efeitos relatados por Miranda também foram encontrados por Farias (FARIAS, LUZ, & RODRIGUES, 2002) e são mostrados na Figura 3. 6.

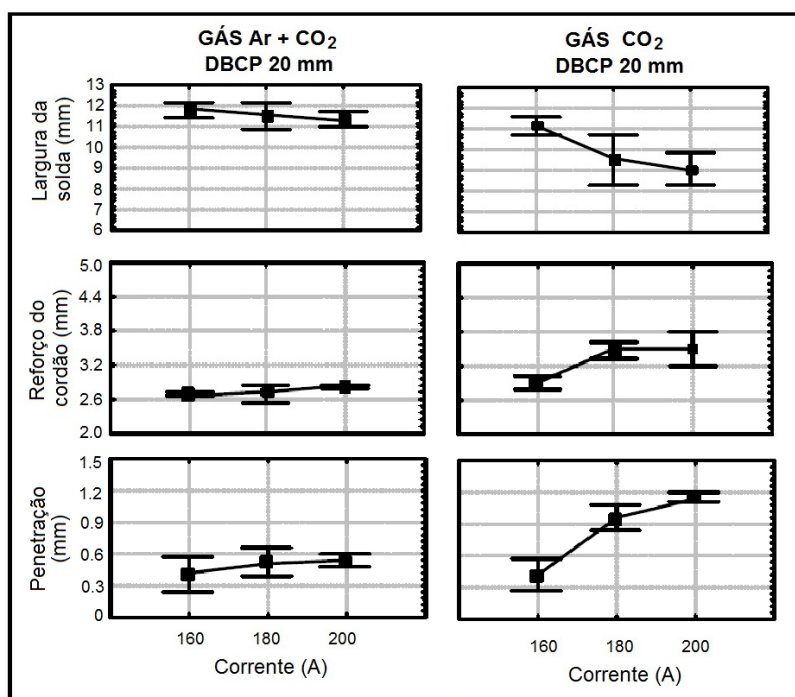


Figura 3. 6 - Influencia do tipo de gás de proteção na geometria do cordão de solda, adaptado de (FARIAS, LUZ, & RODRIGUES, 2002).

3.1.5- Extensão Livre do Eletrodo e DBCP

Outra variável importante no processo MIG/MAG é a extensão livre do eletrodo ou *stick-out* (distância existente entre a extremidade do bico de contato e o final do eletrodo). Entretanto, como a extensão livre do eletrodo é difícil de ser medida com o arco em operação, em geral utiliza-se como forma de medição (indireta) a distância entre o bico de contato e a peça. A distância entre o bico de contato e a peça (DBCP) engloba a extensão livre do eletrodo e o comprimento do arco, como mostra a Figura 3. 7.

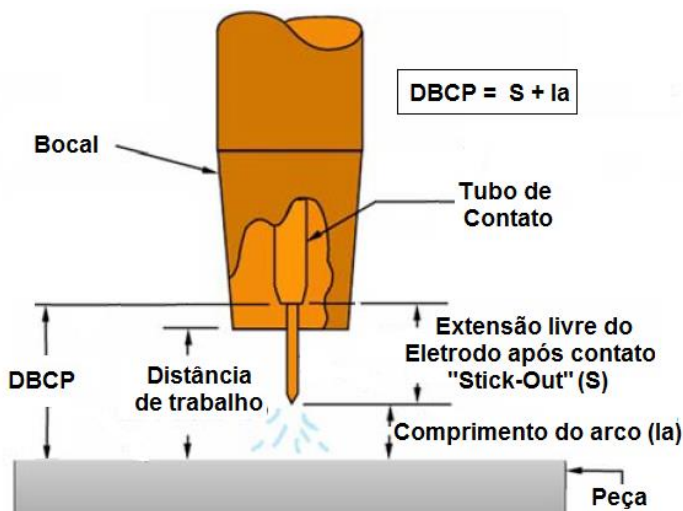


Figura 3. 7 - Representação esquemática do *stick-out* e da DBCP.

Conforme já mencionado neste texto foi demonstrado por Lesnewich (LESNEWICH, 1958) que a taxa de fusão do eletrodo depende do comprimento livre do eletrodo. Para uma dada corrente de soldagem um aumento do comprimento livre do eletrodo determinará uma maior taxa de fusão do eletrodo, pois aumentará a resistência

elétrica do eletrodo e o calor gerado por efeito Joule. Ou então, para manter a taxa de fusão será necessário reduzir esta corrente, como indica a Figura 3. 8.

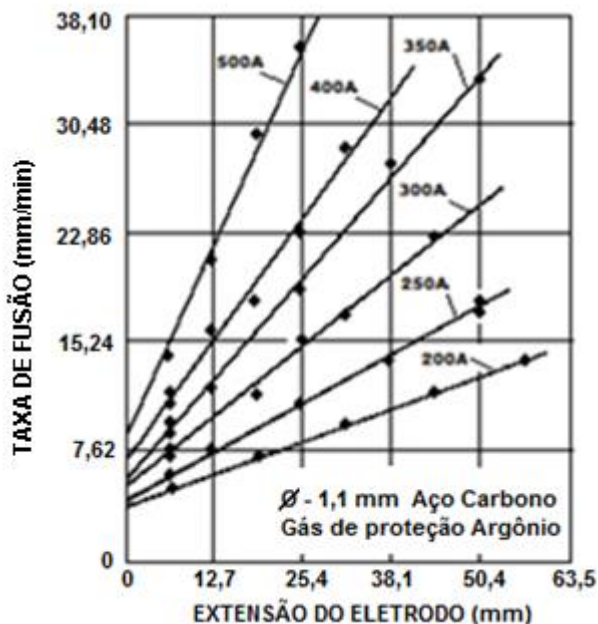


Figura 3. 8 - Efeito do comprimento do eletrodo e da corrente de soldagem na taxa de fusão, adaptado de (LESNEWICH, 1958).

Já Houdcroft e John, 1988apud (GOMES, 2006) destacaram, que no processo MIG/MAG com imposição de tensão para uma velocidade de alimentação do arame eletrodo fixa qualquer aumento na DBCP e, conseqüentemente, no *stick-out* tem o efeito de reduzir a corrente necessária para fundir o eletrodo (mantendo a taxa de deposição), como indicado na Figura 3. 9. De outra parte, como também indica a Figura 3. 9 um aumento simultâneo da DBCP e da velocidade de alimentação

do arame (para manter a corrente) determina o aumento na taxa de deposição do metal de solda.

A variação do *stick-out* influencia a geometria do cordão de solda. Pois como já mencionado, mantidas as demais variáveis do processo um aumento no *stick-out* reduz a corrente de soldagem e por consequência a penetração e a zona fundida do cordão de solda.

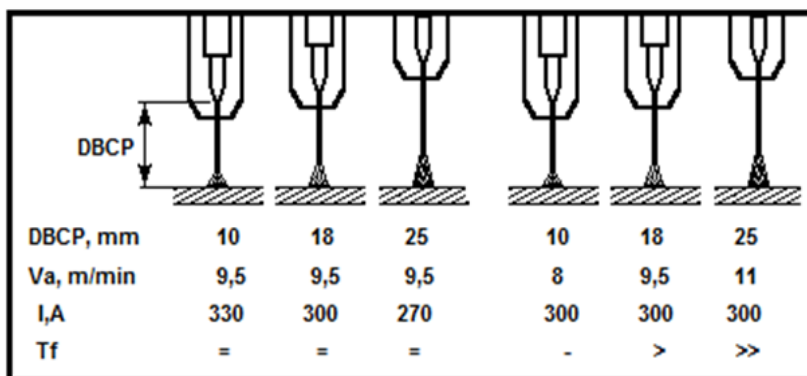


Figura 3. 9 - Efeito da distância bico de contato peça na corrente e na taxa de deposição Houdcroft e John, 1988apud (GOMES, 2006).

Para a soldagem pelo processo MIG/MAG quando operando no modo de transferência por curto-circuito normalmente se utiliza DBCPs curtas (em torno de 12 mm). Entretanto operando nos modos goticular e pulsado é preferível utilizar DBCPs na faixa de 18 a 25 mm. Já para a soldagem com arame tubular geralmente são utilizadas DBCPs mais longas. Como indica a Tabela 3. 2 que mostra as DBCPs utilizadas por diversos autores que estudaram a soldagem de diferentes tipos de arame tubular.

Tabela 3. 2 - Valores de DBCP empregadas na soldagem com diferentes tipos de arame tubular.

Tipo de Fonte	Tipo de Arame tubular	DBCP (mm)	Referências
Tensão Constante	Rutílico	20 e 35	(FARIAS, LUZ, & RODRIGUES, 2002)
	“metal cored”	18	(LUZ, FARIAS, & FERRARESI, 2005)
	Básico, rutílico, “metal cored”	19,5 a 25,5	(STARLING & MODENESI, 2005), (2007)
	Autoprotégido (Fe – Cr – C)	20 e 35	(LIMA & FERRARESI, 2006)
	Autoprotégido	19 a 95	(AWS, Welding Handbook: Welding Processes, 1991)
Corrente Pulsada	Rutílico	22,5	(OLIVEIRA & COSTA, 2007)
Tensão Constante	Rutílico	13,3 a 21,7	(RODRIGUES, PAIVA, & COSTA, 2007) (PAIVA, et al, 2010)
	Rutílico	20	(GARCIA & SCOTTI, 2011)
	Inoxidável ABNT 316 L	10 a 30	(GOMES, COSTA, PAIVA, & BALESTRASSI, 2011)

3.1.6- Indutância

A indutância é de extrema importância para o processo MIG/MAG quando operando no modo de transferência por curto-circuito, pois seu efeito sobre a taxa de aumento e diminuição da corrente afeta diretamente o comportamento de destacamento das gotas, a regularidade da transferência e, em boa parte, a formação de respingos. Em fontes convencionais de soldagem se realiza o ajuste da indutância por meio de um indutor ligado em série com o arco. Já em fontes eletrônicas, existe um circuito que simula o efeito do indutor, ou seja, age de forma a variar a taxa de aumento e diminuição da corrente.

Em soldagem, não é possível se basear somente numa regulagem de um valor de indutância na fonte, pois o que importa é a indutância do sistema, que depende não somente do circuito da fonte, mas também do próprio arco, cabos, etc.. Por este motivo, as fontes possuem regulagens de posições de indutância e não valores de indutância. Então, a melhor forma de se fazer referência à indutância de um equipamento é pelo termo “efeito indutivo”, ou seja, pelas taxas de aumento e diminuição da corrente para uma dada condição de soldagem. A Tabela 3. 3 e a Figura 3. 10 mostram as taxas de crescimento da corrente (di/dt) em função da posição de regulagem do “efeito indutivo” para duas fontes diferentes, as quais possuem escalas díspares. Observa-se que não só o valor de di/dt se torna diferente para uma mesma regulagem, mas também a gradiente de variação de di/dt . Isto suporta a ideia do uso do “efeito indutivo” e não do valor de indutância fornecido por diferentes equipamentos quando se quer comparar regulagens deste parâmetro (SOUZA, et al., 2011).

Tabela 3. 3 - Regulagem do “efeito indutivo” versus taxas de crescimento da corrente (SILVA & FERRARESI, 2003).

Regulagem do “efeito indutivo” da fonte	di/dt (A/ms)
0	136,08
2,5	34,34
5	26,49
7,5	18,68
10	14,52

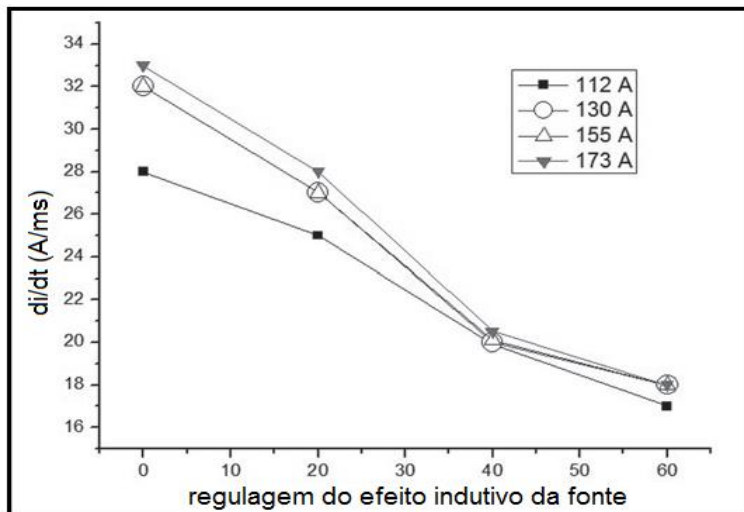


Figura 3. 10 - Regulagem do “efeito indutivo” versus taxas de crescimento da corrente em função da corrente de soldagem (KOBAYASHI, ANASTÁCIO, & NARDINE, 2005).

Ao investigar a influência da variação dos parâmetros de soldagem (tensão de referência, indutância e velocidade de alimentação do arame eletrodo) na qualidade do cordão de solda em alumínio Silva (SILVA & FERRARESI, 2003) observou que a área fundida aumenta para menores indutâncias da máquina (maiores valores de di/dt), como mostra a Figura 3. 11(a) e pontuou que isto ocorre, provavelmente, devido ao maior valor de corrente atingido no instante da transferência metálica (porém não considerou a variação da corrente média). Silva também constatou o mesmo efeito sobre a penetração do cordão de solda, como indica a Figura 3. 11(b) que apresenta uma queda acentuada de penetração entre as posições 0 e 5 da indutância, com a penetração permanecendo praticamente constante a partir dessa posição e Silva destacou ainda que a indutância 0 (zero) implica em variação brusca de

corrente no momento de curto-circuito, gerando uma grande instabilidade na transferência metálica.

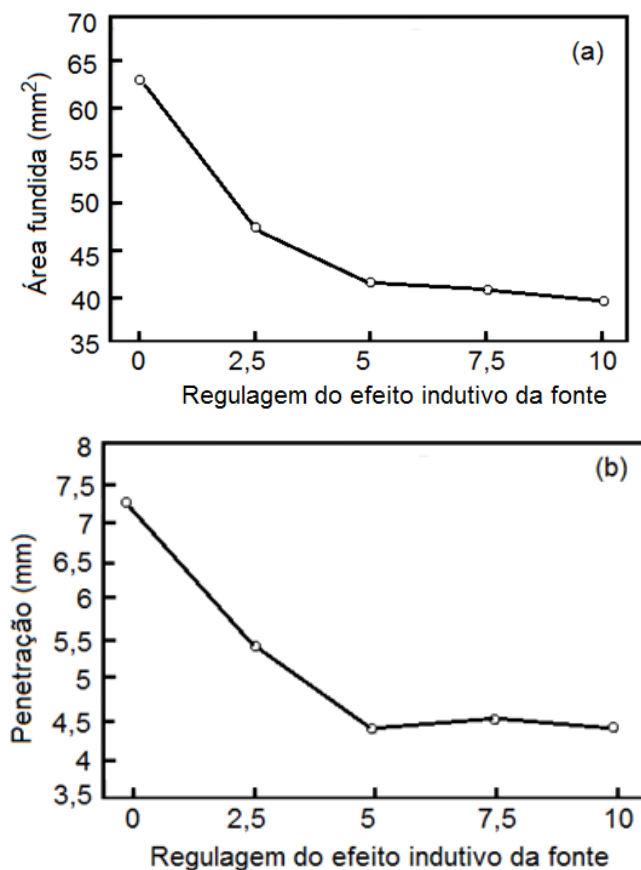


Figura 3. 11 - Efeitos da indutância sobre a área fundida (a) e sobre a penetração(b), adaptada de (SILVA & FERRARESI, 2003).

3.2- CARACTERÍSTICAS DE SAÍDA DOS PROCESSOS

Nos processos MIG/MAG e Arame Tubular, tanto a variação nas condições de soldagem como a variabilidade inerente a esses processos

afetam a transferência metálica, a estabilidade do arco elétrico, a diluição, as dimensões e a geometria do cordão de solda.

3.2.1- Transferência Metálica

A fusão do eletrodo produz a formação e a aglutinação de gotas metálicas de forma periódica. O tamanho, forma e frequência da transferência de gotas de metal através da coluna do arco caracterizam um determinado modo de transferência metálica. Os diferentes modos de transferência do metal de adição afetam a capacidade de soldar em várias posições, a penetração, a estabilidade da poça de fusão e a quantidade de respingos (SUBRAMANIAN, et al., 1998).

Como vários fatores influenciam a transferência metálica, modelos teóricos tais como a teoria do balanço estático de forças e a teoria da instabilidade *pinch*, foram propostos para explicar o fenômeno da transferência metálica (embora com sucesso limitado). A teoria do balanço estático de forças descreve o mecanismo de transferência a partir do balanço das forças atuantes sobre uma gota pendente na extremidade do eletrodo. As principais forças envolvidas nesse balanço são força da gravidade, força de arraste aerodinâmico ou força de arraste do jato de plasma, força de tensão superficial do material e força de origem eletromagnética. Pela teoria do balanço estático de forças quando a soma das forças favoráveis ao destacamento sobrepuja aquelas contrárias ao mesmo, a gota é destacada e impelida em direção à peça (SILVA, DUTRA, & GOHR Jr, 2007).

Já a teoria da *Instabilidade Pinch* considera que acima de certo valor de corrente e, conseqüentemente, com uma maior geração de

calor, a ponta fundida no eletrodo torna-se cilíndrica e não mais em formação progressiva de uma gota, como num conta-gotas. Então o rompimento desse cilindro em gotas sequenciais decorre da instabilidade da coluna de líquido, a partir de constrições locais (Figura 3. 12) que acontecem de forma caótica. Pode-se dizer que dois fatores antagônicos determinam o comportamento desse fenômeno. Por um lado a tensão superficial que tende a reconstruir a superfície cilíndrica procurando uma menor área por volume. Por outro, o *efeito Pinch*, que após uma constrição aparecer tende a aumentá-la ainda mais. Quando o *efeito Pinch* supera o efeito da tensão superficial a coluna se rompe e uma gota residual se forma. Neste caso, os efeitos das outras forças (força gravitacional e força de arraste) passam a ser desprezíveis (SCOTTI & PONOMAREV, 2008).

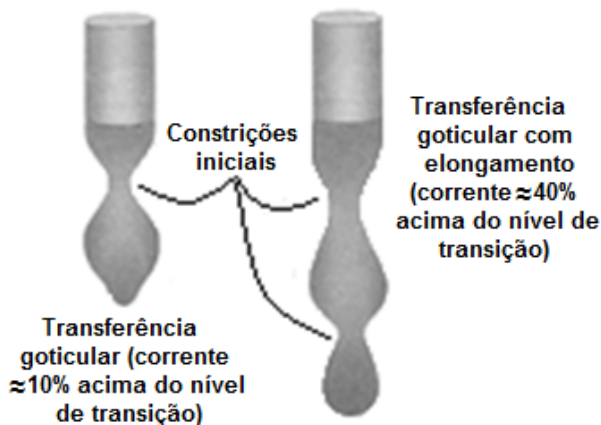


Figura 3. 12 - Ilustração do fenômeno de instabilidade da coluna de metal líquido conforme a Teoria da *Instabilidade Pinch* (SCOTTI & PONOMAREV, 2008).

Como lembrou Scotti (SCOTTI & PONOMAREV, 2008), tem sido demonstrado por pesquisadores contemporâneos que, se abaixo da


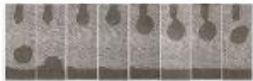





corrente de transição a transferência é dominada pelas forças descritas na teoria do balanço estático de forças, acima a teoria do balanço estático já não satisfaz e neste caso a transferência pode ser explicada por outras teorias, como a da *Instabilidade Pinch*.

3.2.2- Tipos de Transferência Metálica

Na soldagem MIG/MAG, a transferência metálica acontece basicamente por dois mecanismos, que caracterizam duas classes (indicadas na Tabela 3. 4). No primeiro, há o contato da gota com a poça antes do destacamento e, por isto, essa classe de transferência é denominada transferência por curto-circuito. No segundo a gota destaca-se antes do contato com a poça, caracterizando a classe de transferência por vôo livre. Esta última se subdivide ainda em seis diferentes modos conforme as particularidades da formação e destacamento das gotas.

Como destacou Scotti (SCOTTI & PONOMAREV, 2008), estes modos naturais de transferência metálica de uma forma geral apresentam limitações quando se requer a otimização de características operacionais (por exemplo, soldar chapas finas ou fora da posição plana sem grande incidência de respingos), que só foram superadas com o advento de equipamentos mais modernos, que passaram a permitir o controle da transferência metálica. Surgiram assim os modos de transferência metálica controlada, entre os quais o modo de transferência por corrente pulsada.

Tabela 3. 4 - Classes e respectivos modos naturais de transferência metálica que acontecem no processo MIG/MAG (SCOTTI & PONOMAREV, 2008).

Classe de transferência	Modo de transferência	Imagem	Força (efeito) governante principal
Por curto-circuito	Por curto-circuito		Tensão superficial
Por vôo livre	Globular		Gravitacional
	Globular Repulsiva		Gravitacional e reação
	Goticular (ou goticular projetada)		Eletromagnética
	Goticular com alongamento		
	Goticular rotacional		
	Explosiva		Reações químicas

No gráfico da Figura 3. 13 que relaciona a Tensão versus Corrente com os tipos de transferência metálica ao se utilizar equipamento MIG/MAG convencional para a soldagem de diferentes bitolas de arame de aço ao carbono (mistura Argônio + CO₂) pode se

observar a dependência entre variáveis para se atingir uma transferência metálica estável. Este gráfico ilustra também a relação entre a bitola do arame e o tipo de transferência metálica com a espessura do metal de base (espessura da chapa).

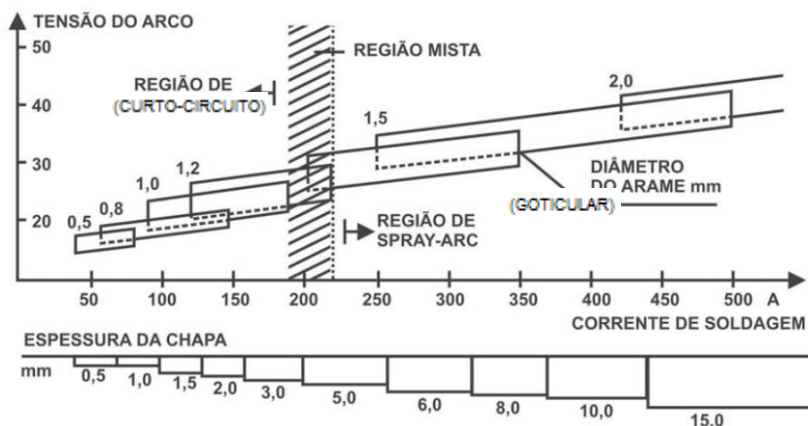


Figura 3. 13 - Mapa de transferência metálica MIG/MAG, Corrente versus Tensão (ZEEMANN, et al).

A Figura 3. 14 apresenta um mapa dos modos de transferências relacionando a tensão com a velocidade do arame, válidas para arame de aço de 1,2mm de diâmetro e gás de proteção Ar-8CO₂, (KIM & EAGAR, 1993).

De acordo com Scotti (SCOTTI & PONOMAREV, 2008), os campos de transferência pelos modos globular repulsiva e explosiva não são apresentados nos mapas porque eles se sobrepõem aos campos de transferência globular e goticular. Além disso, as transferências, globular repulsiva e explosiva são governadas mais pelo gás de proteção e material do arame, respectivamente, do que pela corrente e tensão.

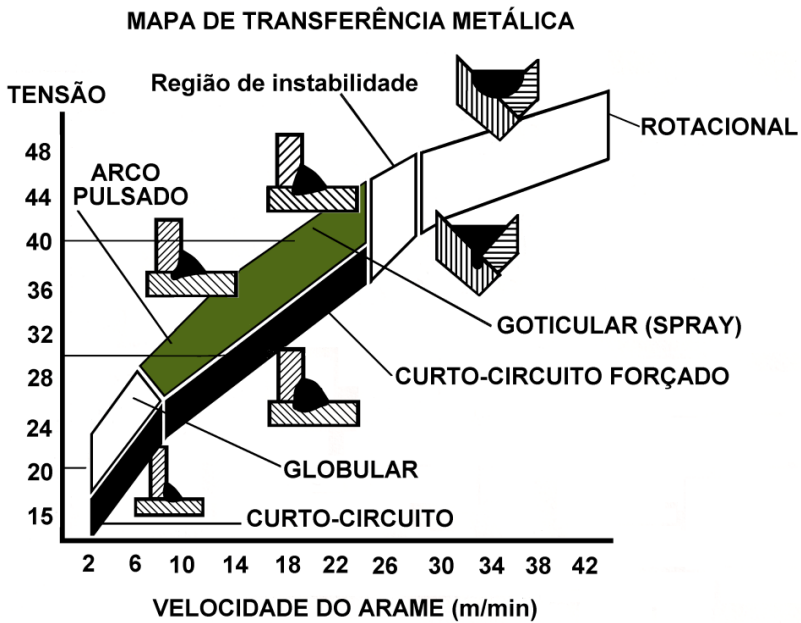


Figura 3. 14 - Mapa de transferência metálica MIG/MAG, Velocidade do Arame versus Tensão (KIM & EAGAR, 1993).

3.2.2.1- Transferência Metálica por Curto-Circuito

Esse tipo de transferência ocorre para um comprimento do arco suficientemente curto (baixa tensão) que possibilita o contato com a poça de fusão e o metal líquido na ponta do eletrodo antes que ocorra o seu destacamento. Esta forma de transferência permite a soldagem com baixos níveis de corrente, o que a torna muito adequada para soldar peças de pequena espessura. Na soldagem com transferência por curto-circuito comumente utiliza-se arames de pequeno diâmetro de 0,6 a 1,2 mm (MODENESI, 2008), (SILVA, Dutra, & GOHR Jr, 2008) e como indicou Graig (GRAIG, 1987) a faixa de corrente situa-se entre 30 e 200 A e a frequência de transferência das gotas pode ser de 20 a 200 vezes

por segundo. Conforme lembrou Essers (ESSERS & VAN GOMPEL, 1984) a ocorrência de respingos é a grande desvantagem desse tipo de transferência e como destacou Modenesi (MODENESI, 2008) a indutância afeta diretamente o comportamento de destacamento das gotas, pois se durante um curto-circuito a corrente de soldagem aumentar rapidamente a ruptura do contato líquido entre a poça de fusão e o eletrodo ao final do curto-circuito pode ser violenta (ou mesmo, explosiva) com a vaporização de parte do material e a formação de respingos, de outra parte, se durante o curto-circuito a corrente se elevar muito lentamente, o arame poderá mergulhar na poça de fusão antes da ruptura da ponte líquida e o arame superaquecido formará um emaranhado não fundido sobre o metal de base. A Figura 3. 15 apresenta imagens de uma transferência em curto-circuito, filmada em alta velocidade, em sincronismo com a aquisição de sinais de tensão e corrente.

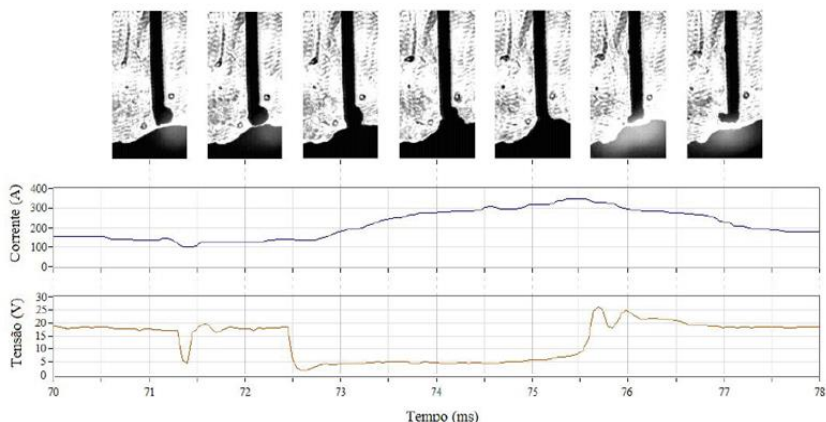


Figura 3. 15 - Sequência de imagens em sincronismo com aquisição de sinais de tensão e corrente durante transferência em curto-circuito (LOPERA, et. al., 2011).

3.2.2.2- Transferência Metálica Globular

Ocorre em níveis de tensão mais elevados que no curto-circuito, as gotas de metal fundido são transferidas para a poça de fusão principalmente pela ação da força gravitacional, o que limita a soldagem à posição plana. O diâmetro das gotas é maior que o diâmetro do arame (vide Figura 3. 16).

É comum neste modo de transferência a ocorrência de falta de fusão, falta de penetração e respingos. Segundo Quitès (QUITÈS, 2002) este não é um modo muito utilizado na indústria. Também outros autores como Amin (AMIN M. , 1983 b), Vaidya (VAIDYA, 2002) citam a transferência globular como indesejável e a ser evitada, devido à instabilidade generalizada observada neste modo de transferência.

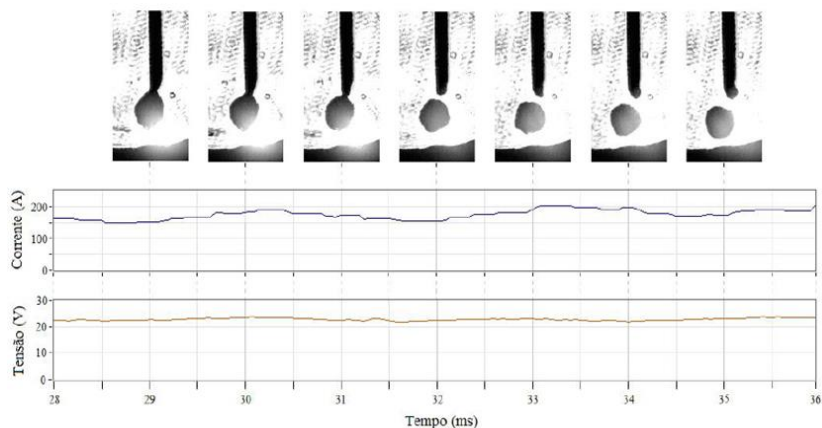


Figura 3. 16 - Sequência de imagens em sincronismo com aquisição de sinais de tensão e corrente durante transferência globular (LOPERA, et. al., 2011).

3.2.2.3- Transferência Metálica Goticular

A transferência goticular projetada ou spray se caracteriza pela transferência de pequenas gotas uniformes (com diâmetro próximo ao do eletrodo) de forma sequencial, em alta frequência. Como não ocorrem curtos-circuitos os oscilogramas de corrente e tensão deste tipo de transferência não mostram variações significativas, como indica a Figura 3. 17. Ocorre normalmente na soldagem MIG/MAG com polaridade positiva, com altas correntes e tensões elevadas em atmosfera à base de argônio (SCOTTI & PONOMAREV, 2008).

Uma condição indispensável para que este modo de transferência ocorra é que a corrente de soldagem ultrapasse um valor crítico (I_c), denominado de corrente de transição, que na verdade é uma faixa e não um valor único (vide, Tabela 3. 5). Quando a corrente de soldagem excede o nível de transição ocorre uma redução significativa e abrupta do tempo de formação e destacamento das gotas. Determinando uma redução no tamanho das gotas e também um aumento súbito da frequência da transferência das mesmas ao mesmo tempo em que o arco que antes cobria apenas a parte inferior da gota na ponta do eletrodo passe a envolvê-la completamente. Neste caso a transferência não é mais controlada pela força de gravidade, passando a ser dominada pelas forças eletromagnéticas (SCOTTI & PONOMAREV, 2008). Na soldagem dos aços, adições de CO_2 ao gás de proteção aumentam os valores da corrente de transição, para adições de CO_2 superiores a aproximadamente 30 esta forma de transferência não é mais observada (SODERSTROM & MENDEZ, 2008).

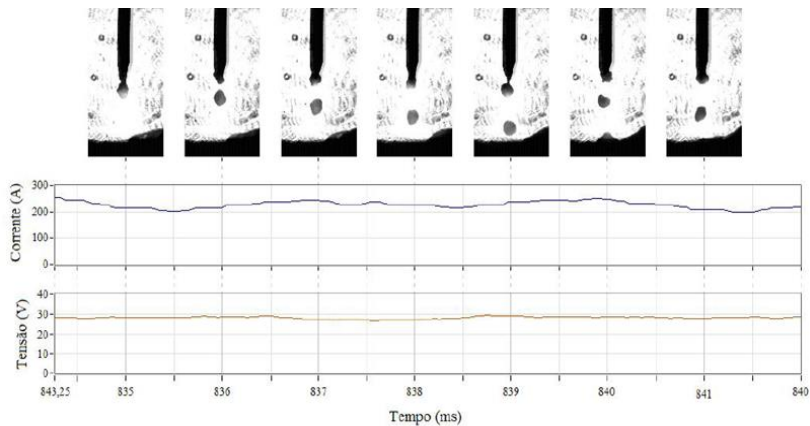


Figura 3. 17 - Sequência de imagens em sincronismo com aquisição de sinais de tensão e corrente durante transferência goticular projetada (LOPERA, et. al., 2011).

A Tabela 3. 5, indica valores típicos das faixas de corrente de transição para diferentes materiais, diâmetros de eletrodo e gases de proteção, pois a corrente de transição depende também de outros fatores operacionais, como a composição e comprimento livre reais do arame.

Como enfatizou Scotti (SCOTTI & PONOMAREV, 2008), as principais características da transferência goticular são: elevada estabilidade do arco, praticamente não gera respingos, tem bom molhamento e boa penetração na solda, proporciona cordões com bom aspecto superficial, favorece a soldagem em alta velocidade e apresenta alta taxa de deposição. Devido a estas qualidades, quando as condições permitem, a transferência goticular é mais desejada.

Tabela 3. 5 - Faixas de corrente de transição para diferentes materiais e diâmetros de arame, utilizando diferentes misturas como gás de proteção (SCOTTI & PONOMAREV, 2008).

Material Arame-Eletrodo	Atmosfera Protetora	Diâmetro Arame Eletrodo (mm)	Corrente Transição (A)
Aço Carbono	9%Ar + 2%O ₂	0,6	130 – 135
		0,8	150 – 160
		0,9	160 – 170
		1,0	180 – 190
		1,1	210 – 230
		1,2	220 – 240
		1,6	260 – 280
Aço Carbono	95%Ar + 5%CO ₂	0,8	135 – 145
		1,0	180 – 190
		1,2	230 – 250
Aço Carbono	80%Ar + 20%CO ₂	1,6	270 – 285
		0,8	155 – 165
		1,0	200 – 210
Aço Carbono	80%Ar + 20%CO ₂	1,2	265 – 280
		1,6	320 – 345
		0,9	130 – 150
		1,0	160 – 170
Aço Inoxidável	98%Ar + 2%O ₂	1,1	180 – 200
		1,2	210 – 230
		1,6	260 – 270
		1,6	260 – 270

Porém como destacou Marques (MARQUES, MODENESI, & BRACARENCE, 2007) a necessidade de uma corrente relativamente alta (acima da faixa de transição) dificulta ou inviabiliza a soldagem

com transferência goticular de chapas finas (pela facilidade de furar o metal base) ou a soldagem fora da posição plana (pela formação de uma poça de fusão grande e de difícil controle). Ainda, conforme Scotti (SCOTTI & PONOMAREV, 2008), à medida que a corrente de soldagem é aumentada, a transferência goticular projetada transforma-se na transferência goticular com alongamento (sem aparelhagem especial não se consegue visualizar diferenças entre estes modos). Para correntes ainda maiores do que aquela da transferência goticular com alongamento ocorre uma nova transição para o modo de transferência goticular rotacional. Nestas condições, a transferência não é mais axial; as gotas passam a ser transferidas na direção oblíqua (quase radial) do arco, provocando normalmente uma grande quantidade de respingos finos.

3.2.2.4- Transferência Metálica por Corrente Pulsada

Conforme a literatura o processo MIG/MAG pulsado (também referenciado como MIG-P) apareceu com intuito de reunir as melhores características das versões por curto-circuito e goticular em um só processo, ou seja, obter-se uma transferência estável e regular, (que proporcione pouco ou nenhum respingo e bom acabamento do cordão) a um valor de corrente baixa (permite a soldagem em todas as posições e sua utilização em chapas finas, pela baixa energia de soldagem), mas com tensão maior que no curto circuito melhorando a molhabilidade. Este modo é obtido modulando-se o sinal de corrente de soldagem entre dois níveis (indicados na Figura 3. 18). No nível mais baixo, atua a corrente de base (I_b), durante o tempo de base (t_b). No segundo nível, uma corrente de pulso (I_p) de valor superior ao valor da corrente de

transição é sobreposta à corrente de base, por um intervalo de tempo pulso (t_p), com o objetivo de destacar uma gota metálica. A magnitude desses pulsos e a frequência de ocorrência dos mesmos controlam o destacamento da gota (MOTTA, 2002). Já a regulação dos parâmetros na fase de base ($I_b \times t_b$) é usada para se obter uma corrente média com valores abaixo da faixa de corrente de transição, sendo que a I_b possui limite mínimo (SCOTTI & PONOMAREV, 2008).

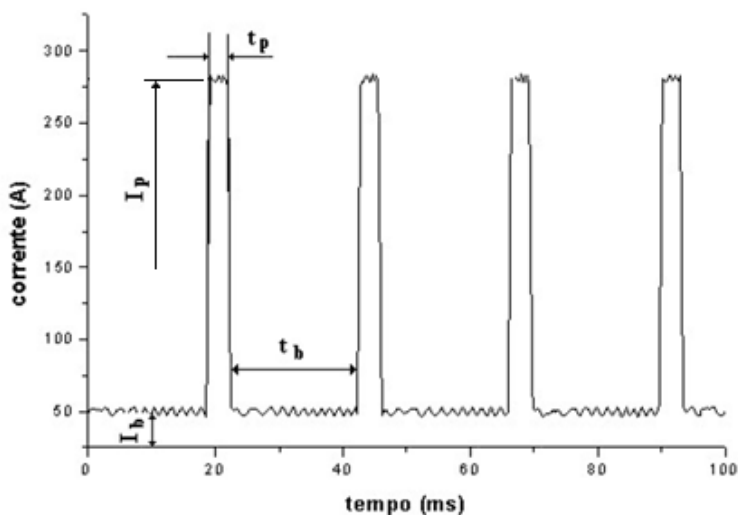


Figura 3. 18 - Oscilograma de corrente pulsada, com $I_p = 300$ A, $t_p = 3,9$ ms, $I_b = 50$ A, $t_b = 23$ ms, (MOTTA, 2002).

O nível de energia do arco e, portanto, a taxa de fusão do arame é determinada pela corrente média (que resulta da combinação dos parâmetros de pulso e de base). Assim, por exemplo, para o arame eletrodo de aço de 1,2 mm e proteção com gás Ar + $2O_2$ é possível obter uma transferência goticular controlada com corrente média de 50A, enquanto que a faixa da corrente de transição neste caso é em torno de

220-240A. Vários aspectos da soldagem pulsada têm sido apresentados na literatura, por exemplo, operando com corrente pulsada ocorre uma pequena formação de salpicos e uma menor formação de fumos (FERREE, 1995). Conforme French (FRENCH & BOSWORTH, 1995) além da possibilidade de soldar fora da posição plana e produzir soldas de maior qualidade do que no modo convencional a soldagem com arame tubular pelo modo pulsado apresenta maior faixa de valores de corrente.

3.2.3- Técnicas para Identificar o tipo de Transferência Metálica

Diversas técnicas são empregadas para identificar o tipo de transferência metálica durante a soldagem, entre elas tem-se:

- Identificação por meio dos sinais de tensão e de corrente de soldagem (oscilogramas);
- Identificação por meio de filmagem em alta velocidade “perfilografia” (Shadowgraphy);
- Sincronização entre os sinais de tensão e corrente com as imagens de filmagem em alta velocidade.

A identificação da transferência metálica por meio de oscilogramas foi utilizada por Heald (HEALD, et. al., 1994) que ao realizar a construção de mapas de transferência metálica para o eletrodo AWS ER100S-1, com diâmetro de 1,2 mm e proteção com gás Ar + 2O₂, recorreu à análise dos desvios padrão da corrente média como forma de identificar os modos de transferência. Constatou que, embora os desvios padrão de corrente média não possam ser utilizados para fazer a distinção entre os modos de transferência globular e curto-circuito, podem ser usados para indicar a distinção entre estes modos e o modo de transferência goticular.

Outra maneira de caracterizar o tipo de transferência metálica é através de filmagens em alta velocidade com sombreado por laser ou LED, técnica chamada de *perfilografia*. Se análise das imagens obtidas por esta técnica resultar em uma gota com diâmetro menor do que o diâmetro do arame eletrodo considera-se a transferência no modo goticular. Se o diâmetro da gota for maior do que o diâmetro do arame, fica caracterizada a transferência no modo globular. Se a gota toca a poça de fusão, fica reconhecida como transferência em curto-circuito.

As imagens obtidas pela técnica de *perfilografia* permitem identificar o modo de transferência metálica presente e se o arco elétrico encontra-se estável. Porém, diferentemente dos oscilogramas de tensão e corrente, o processo de filmagem não permite dizer em que momento exato um determinado fenômeno ocorreu. Assim, para unir as vantagens presentes nos oscilogramas e na filmagem em alta velocidade, foi executada mais recentemente a sincronização entre os sinais de tensão e corrente com as imagens documentadas, (VILARINHO, 2000), (COSTA, STARLING, & MODENESI, 2008), (LOPERA, et. al., 2011).

Vide por exemplo as Figuras 3.15, 3.16 e 3.17 que mostram a sincronização entre os sinais de tensão e corrente e a filmagem em alta velocidade.

3.2.4- Estabilidade do Processo

A estabilidade do processo de soldagem a arco com eletrodo consumível, tema bastante complexo e muito estudado, depende das condições do arco, da transferência de metal e de vários outros fatores como as condições de alimentação do arame e características da fonte de

energia. A transferência por curto circuito, devido suas características, é a mais utilizada na soldagem MIG/MAG e também muito estudada. Na transferência por curto-circuito as extinções do arco afetam a estabilidade, isto é, um arco estável possui uma transferência periódica e um tempo de curto o menor possível. Como se percebe na Figura 3. 19 (que mostra oscilogramas de tensão e corrente de uma transferência por curto-circuito), as características tensão e corrente do arco possuem diversos índices que indicam a regularidade no modo de transferência por curto-circuito, como a tensão do arco aberto (U_{ab}); o tempo de duração do curto (t_{cc}); o tempo que o arco permanece aberto (t_{ab}); o período de transferência das gotas T ($t_{ab} + t_{cc}$); a corrente do arco aberto (I_{ab}); a corrente de curto-circuito (I_{cc}); as taxas de subida e descida da corrente (di/dt). Vários critérios de análise de estabilidade baseado nestes índices têm sido citados na literatura.

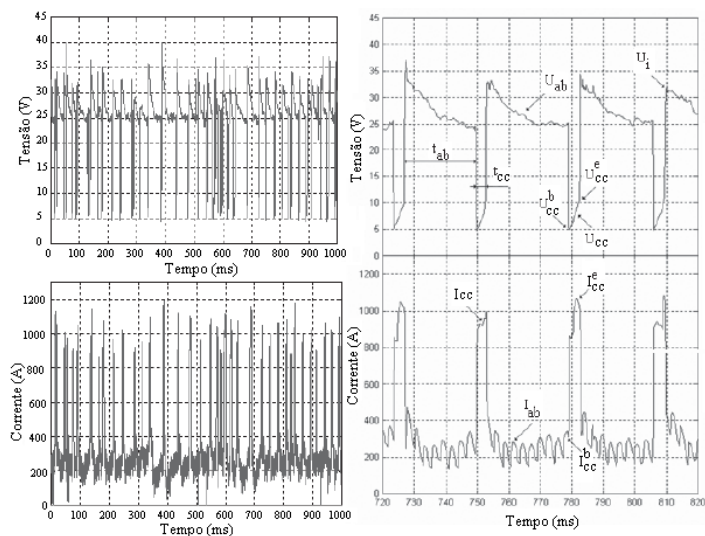


Figura 3. 19 - Índices da transferência metálica por curto-circuito (ROCA, et al., 2005).

3.2.4.1- Critérios de Estabilidade em Transferência por Curto-circuito.

Antes, avaliada apenas com base em características elementares do processo, tais como ruídos e respingos, hoje, a estabilidade, é avaliada fazendo-se uso de vários meios e técnicas. Assim, por exemplo, Mita (MITA, SAKABE, & YOKOO, 1988) propôs um índice (w) de regularidade composto por elementos tirados dos oscilogramas (tempos de arco aberto, tempos de curto-circuito, picos de corrente de curto-circuito) e seus respectivos desvios padrão. Com menores valores do índice indicando melhor estabilidade. Como mostra a Figura 3. 20, que apresenta resultados do índice w em função da tensão, para soldas realizadas com o processo MIG/MAG de aço carbono com 1,2 mm de diâmetro e a proteção de misturas com diferentes teores de CO_2 , e indica a existência de um ponto de inflexão a partir do qual valores crescentes ou decrescentes de tensão resultam em menor regularidade.

Para analisar a estabilidade, Baixo (BAIXO & DUTRA, 1990) utilizou como índices a média dos tempos de duração do curto-circuito, dos períodos de transferência, dos picos da corrente de curto, e seus respectivos desvios padrão. Este autor também observou a existência de um ponto de inflexão a partir do qual valores crescentes ou decrescentes de tensão resultam em menor regularidade, como mostram os gráficos da Figura 3. 21 que apresentam o desvio padrão relativo da média dos picos de corrente (DP MP) e dos tempos médios de curto-circuito (DP TMC). Nestes gráficos se pode observar ainda que para cada valor de velocidade de alimentação existe apenas um ajuste de tensão capaz de produzir uma condição de estabilidade máxima. Entretanto, segundo este autor, apesar de existirem pontos ótimos em uma faixa adjacente de

tensão o processo apresenta variações muito pequenas no índice de estabilidade.

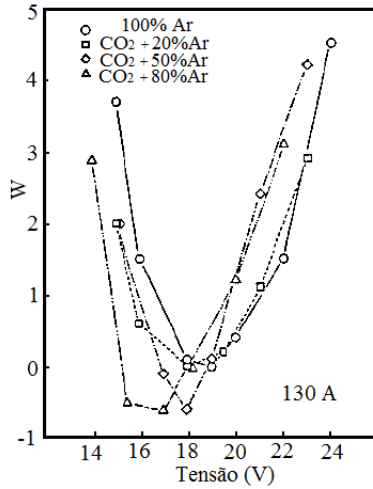


Figura 3. 20 - Índice de regularidade (W) em função da tensão de soldagem (MITA; SAKABE, &YOKOO, 1988).

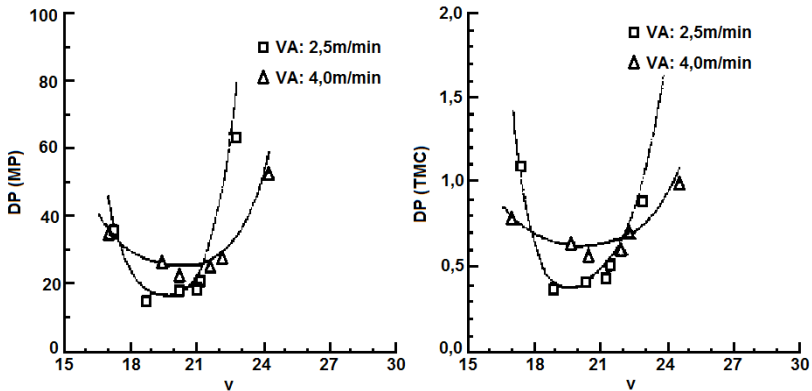


Figura 3. 21 - Distribuição do DP (MP) e do DP (TMC) em função da tensão média de soldagem (arame ER 70S-6, diâmetro 1 mm, DBCP 15mm, di/dt = 47 KA/s), (BAIXO & DUTRA, 1990).

Ao analisar os histogramas dos índices anteriormente citados Baixo (BAIXO & DUTRA, 1990), observou que a tensão (para uma dada velocidade de alimentação do eletrodo) e a indutância são as variáveis críticas para estabelecer uma condição adequada de soldagem. Ao utilizar a quantidade de respingos gerada em função da tensão para analisar a estabilidade Kang (KANG & RHEE, 2001), obteve resultados parecidos com Mita (MITA, SAKABE, & YOKOO, 1988) e Baixo (BAIXO & DUTRA, 1990), ou seja, existe um ponto de inflexão a partir do qual valores crescentes ou decrescentes de tensão resultam em menor regularidade (maior quantidade de respingos), como indicam os gráficos da Figura 3. 22.

Ao estudar a estabilidade da transferência por curto-circuito utilizando ciclogramas, gerados a partir dos pares (coordenadas) dos valores instantâneos da corrente e da tensão, Roca (ROCA, et al., 2005), propôs um algoritmo para o cálculo da área de cada ciclograma gerado no gráfico e usou como índice de estabilidade o desvio padrão da média destas áreas (quanto maior o desvio padrão mais instável a transferência). Este autor constatou que a velocidade de alimentação e a distância bico de contato peça (DBCP) são parâmetros que influenciam na estabilidade do processo. Neste estudo observou que aumentar a velocidade de alimentação, mantendo os outros parâmetros fixos resulta em um processo mais instável, com gotas irregulares e muitos respingos. Observou ainda que aumentar a DBCP mantendo outros parâmetros fixos também resulta em um processo mais instável.

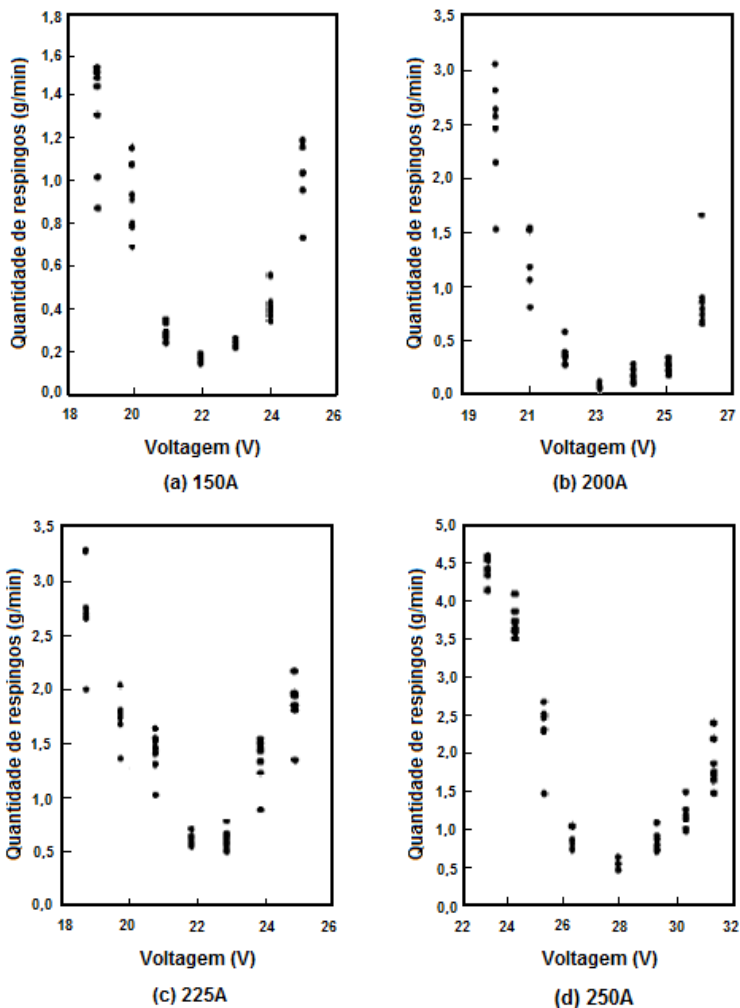


Figura 3. 22 - Quantidade de respingos gerada em função da tensão de soldagem (KANG & RHEE, 2001).

A técnica para avaliar a estabilidade através da medição da frequência de transferência metálica (na qual maior frequência indica maior estabilidade da transferência) foi utilizada por diversos autores, como por exemplo, Den Ouden (DEN OUDEN & HERMANS, 1999) e

Souza (SOUZA, et al., 2011). Como mostra a Figura 3. 23 a frequência tem uma tendência de crescer até um máximo e cair continuamente para maiores valores de tensão de soldagem. Menores valores de frequência são esperados para maiores valores de tensão (maiores comprimentos de arco), pois se criam condições para a gota crescer antes de se destacar. Já para valores muito baixos de tensão (arcos muito curtos) a diminuição da frequência justifica-se pelo caráter explosivo da transferência nestas condições o que faz o arco atingir valores altos logo em seguida de cada aproximação gota-poça demorando um pouco mais a ocorrer uma nova aproximação

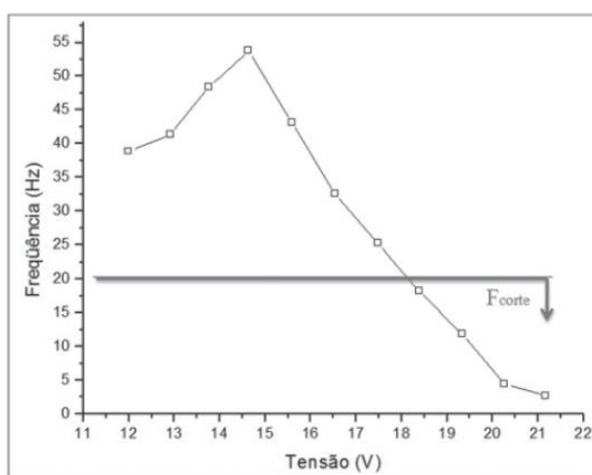


Figura 3. 23 - Curva de frequência em função de tensão de soldagem para velocidade de alimentação de 2,05 m/min (107 A) e gás de proteção Ar+8CO₂, adaptado de (SOUZA, et al., 2011).

Ainda na Figura 3. 23 a F_{corte} indica que abaixo de uma determinada frequência há grandes possibilidades das gotas serem grosseiras, ou seja, o processo estar operando num modo combinado conhecido como globular/curto-circuito.

3.2.4.2- Critérios de estabilidade em Transferência Globular e Goticular.

Nas transferências goticular e globular, a estabilidade pode ser avaliada, por exemplo, pelo nível de respingos e ou pelos oscilogramas. No caso da transferência goticular, o processo é, em geral, bastante estável, com baixa geração de respingos. A transferência globular é mais instável do que a goticular, com níveis de respingos e desvios padrão dos níveis de tensão e correntes de soldagem maiores devido ao tamanho das gotas.

3.2.5- Zonas de um Cordão de Solda e a Diluição

A solda de união ou revestimento não é constituída unicamente pelo que se convencionou chamar de cordão de solda. Do ponto de vista da metalurgia da soldagem, nas soldas existem três zonas de particular interesse, Metal Base (MB), Zona Termicamente Afetada (ZTA) e Zona Fundida (ZF), as quais podem ser identificadas em uma macrografia, como indicado na Figura 3. 24.

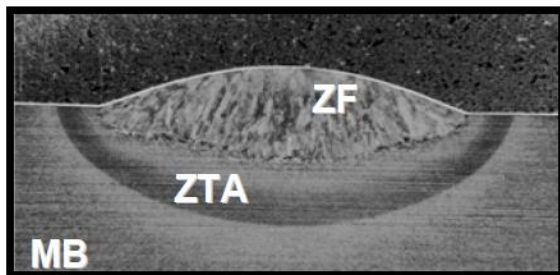


Figura 3. 24 - Macrografia de solda obtida por simples deposição sobre chapa plana.

As principais particularidades relacionadas às três zonas da junta soldada, indicadas na Figura 3. 24 são:

3.2.5.1- Metal Base (MB)

É a região constituinte da junta soldada que não sofreu qualquer alteração em suas características físicas, químicas ou metalúrgicas, ou seja, o material utilizado para a construção da estrutura metálica, nesta região, não sofreu qualquer influência permanente do processo de soldagem (WAINER, BRANDI, & HOMEM DE MELLO, 1992).

3.2.5.2- Zona Termicamente Afetada (ZTA)

A *American Welding Society* (AWS) define a zona afetada pelo calor (ZAC) ou Zona termicamente afetada (ZTA) como a porção do metal de base que tenha sofrido alterações em suas propriedades mecânicas ou microestrutura, causadas pelo calor gerado num processo de soldagem, brasagem ou corte térmico. As alterações na ZTA podem ser observadas através das técnicas de análise que utilizam a microscopia ou medidas através de perfis de dureza (AWS, *Welding Handbook: Welding Science & Technology*, 2001). A ZTA pode ser dividida em várias regiões (região de crescimento de grão, região de refino de grãos, região parcialmente transformada ou intercrítica) de acordo com a faixa de temperatura máxima atingida e com o ciclo térmico resultante do processo de soldagem.

3.2.5.3- Zona Fundida (ZF)

A zona fundida é composta pelo metal de base e metal de adição ou somente pelo metal de base, no caso de soldagem autógena. Nesta região as temperaturas são maiores que a temperatura de fusão do material sendo a região da junta soldada onde efetivamente ocorreu

fusão e subsequente solidificação. A microestrutura, e por consequência as propriedades mecânicas do metal de solda são muito diferentes do metal de base, mesmo no caso da solda autógena. Pois as diferenças nas microestruturas não estão relacionadas somente às composições químicas, mas são resultado direto da sequência de reações com gases e com fases líquidas não metálicas (escórias e fluxo) durante a soldagem e a solidificação da solda, considerando ainda a taxa de resfriamento e os ciclos térmicos de soldagem (SVENSSON, 1994), (AWS, Welding Handbook: Welding Science & Technology, 2001).

A composição química final da zona fundida depende da diluição, ou seja, da participação relativa do metal de base na formação da zona fundida. O percentual de diluição pode ser estimado a partir de macrografias da seção transversal da junta soldada, como indicado na Figura 3. 25.

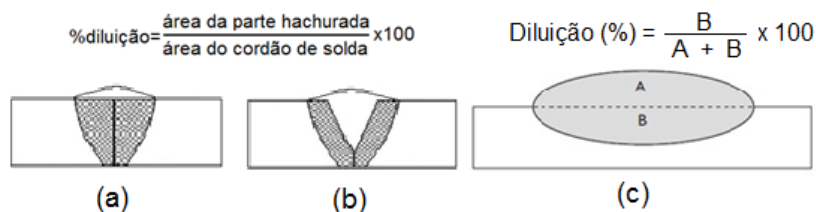


Figura 3. 25 - Estimativa de diluição a partir da geometria da solda: (a) junta de topo; (b) junta com chanfro em V; (c) depósito sobre chapa.

Onde na Figura 3. 25 no item (c) depósito sobre chapa a letra A identifica a área de reforço da solda e a letra B identifica a área de penetração da solda. Nas aplicações em aços de baixo carbono a diluição tem pouca importância no comportamento da junta em serviço, entretanto, em algumas aplicações especiais, a diluição se torna determinante no processo, podendo favorecer falhas durante a operação

do equipamento, (ZEEMANN, LIMA, & EMYGDIO, 1992). A diluição varia com o processo de soldagem e suas condições de aplicação. As faixas típicas de diluição para alguns processos de soldagem a arco são indicadas na Tabela 3. 6.

Tabela 3. 6 - Faixa de diluição de alguns processos de soldagem a arco (FBTS, 2010).

PROCESSO	DILUIÇÃO (%)
Eletrodo Revestido	25-35
TIG - autógeno	100
TIG - com adição de arame	2-20
MIG/MAG	10-30
ARAME TUBULAR	20-50
ARCO SUBMERSO ARAME	40-50
ARCO SUBMERSO FITA	15-20

3.3- MEDIDAS DE VARIABILIDADE

A estatística descritiva, que é um ramo da estatística, que aplica várias técnicas para descrever um conjunto de dados e diferencia-se da estatística inferencial, ou indutiva, pelo objetivo: organizar, sumarizar dados ao invés de usar os dados em aprendizado sobre a população. Na estatística descritiva algumas medidas que são normalmente usadas para descrever um conjunto de dados são medidas de tendência central e medidas de variabilidade ou dispersão. As medidas de tendência central que incluem a média, a mediana e a moda nos dão uma ideia da concentração dos dados em torno de um valor. Entretanto, é preciso também conhecer suas características de espalhamento ou dispersão (medidas de variabilidade). As medidas de variabilidade incluem a variância, o desvio padrão e o desvio padrão relativo (ou coeficiente de

variação). Como apontou Montgomery (MONTGOMERY, 2004) à medida que a variabilidade aumenta a variância também aumenta. A unidade de variância é expressa no quadrado da variável original. Assim, é costume utilizar a raiz quadrada da variância, chamada desvio padrão que expressa a dispersão na unidade original da variável. Mas em muitas situações o desvio padrão não nos diz muita coisa, por exemplo, um desvio padrão de duas unidades pode ser considerado pequeno para um conjunto de valores com média de duzentas unidades, no entanto, se a média for igual a vinte unidades, o mesmo não pode ser dito. Para contornar essas limitações, podemos caracterizar a dispersão ou variabilidade dos dados em termos relativos a seu valor médio, medida denominada desvio padrão relativo ou coeficiente de variação, expressa em termos percentuais.

4- PROCEDIMENTO EXPERIMENTAL

Neste capítulo, inicialmente são detalhados, na Tabela 4. 1, os corpos de prova, metais de adição e parâmetros fixos utilizados nos ensaios (soldas) realizados neste trabalho. Após são descritas as etapas do planejamento experimental, onde são detalhados os procedimentos utilizados para determinar os parâmetros para ocorrência de transferência estável dentro de cada região de transferência metálica de interesse (curto-circuito, goticular e pulsado), na sequência são descritos os procedimentos para determinar como diferentes condições de soldagem afetam a variabilidade da diluição e da geometria dos cordões de soldas realizadas de forma automática e finalmente são descritos os procedimentos para determinar como diferentes condições de soldagem afetam a variabilidade da diluição e da geometria dos cordões de solda realizados de forma semiautomática.

Tabela 4. 1 – Corpos de prova, metais de adição e parâmetros fixos.

Corpos de prova
De aço carbono ABNT 1020 com espessura = 15 mm, largura 40 mm e comprimento = 120 mm.
Metais de adição
Arame de aço carbono (AWS ER70S-6) e Arame tubular rutílico (AWS E71T-1), ambos com diâmetro 1,2 mm.
Parâmetros fixos
Gás de proteção Argônio + 25 CO ₂ (C25) Vazão do gás de proteção = 15 l/min Ângulo de ataque da tocha = 90° Polaridade CC+

O gás de proteção foi utilizado com os dois processos.

4.1- EQUIPAMENTOS E ACESSÓRIOS

4.1.1- Fonte de Soldagem

Para executar as soldas utilizou-se uma fonte multiprocesso da Marca IMC modelo DIGIPLUS A7 (versão 450), que usa um processador ARM 7 de 32 bits, em que o número da versão (450/600/800) indica o valor em ampères da corrente máxima que o equipamento pode operar.

A operação deste equipamento é realizada através de um painel com display e teclas, por meio do qual são realizados a seleção dos processos e o ajuste das variáveis. A DIGIPLUS A7 pode também ser comandada externamente por computador selecionando-se no painel IHM (interface homem máquina) a opção “controle externo” que aparece no “display”. As características elétricas do equipamento DIGIPLUS A7 modelo 450 são mostradas na Tabela 4. 2.

Tabela 4. 2- Características elétricas da fonte da IMC modelo DIGIPLUS A7 (450).

Características	Capacidade
Tensão de alimentação trifásica	380 V
Tensão em vazio (configurável de fábrica)	68 V
Corrente a 100 de fator de carga	280 A
Potência nominal	10 KVA
Faixa de corrente	5 – 450 A
Corrente de entrada nominal por fase	15 A
Ripple de corrente	8 A
Fator de Potência	0,94

4.1.2- Sistema de deslocamento da tocha

Nas soldas realizadas de forma automática para deslocamento da tocha foi utilizada uma máquina de corte portátil (tartaruga), marca WHITE MARTINS modelo MC 46, com velocidades de deslocamento na faixa de 0 a 100 cm/min (0 a 1000 mm/min).

4.1.3- Sistema de Aquisição de Dados

Para a monitoração e coleta de dados durante a realização das soldas utilizou-se o Sistema de Aquisição Portátil (SAP 4.0). Desenvolvido pela IMC Soldagem este sistema é composto de sensores para medir os sinais instantâneos de corrente, tensão, velocidade de arame, vazão de gás de soldagem e por um software de aquisição e análise destes sinais. Este sistema de monitoração, coleta e análise de sinais de soldagem, tem entre outras funcionalidades a capacidade de apresentar na tela do microcomputador a leitura instantânea das grandezas corrente, tensão, velocidade de arame e vazão de gás e a leitura dos valores médios das grandezas citadas com amostras de 0,1 s ou 1s. O SAP foi projetado para ser conectado a um LAPTOP (através de porta USB). Algumas características técnicas do SAP são mostradas na Tabela 4. 3.

Tabela 4. 3- Característica metrológicas do SAP.

Variável	Faixa	Resolução	Erro Al.
Corrente	± 600 A	0,8 A	2
Tensão	± 100 V	0,1 V	1
Vel. Arame	0 a 500 m/min.	0,1 m/min.	2
Frequência de aquisição	5000 Hz	----	0,1

Erro Al. - É o erro dado em percentual em relação à LEITURA.

4.2- PLANEJAMENTO EXPERIMENTAL

4.2.1- Parâmetros de Transferência Estável

Para determinar os parâmetros de transferência estável dentro de cada região de transferência metálica de interesse (curto-circuito, goticular e pulsado) foram realizadas soldas automáticas utilizando o processo MIG/MAG, a técnica de simples deposição sobre chapa e as condições indicadas na Tabela 4. 1. Para obter estes parâmetros foi necessário, ainda o estabelecimento de algumas condições gerais, a saber:

- Utilização de faixas de corrente adequadas para cada modo de transferência;
- Utilização de DBCPs adequadas para cada modo de transferência.

4.2.1.1- Procedimentos para determinar os parâmetros de transferência estável pelo modo curto-circuito.

A fim de encontrar parâmetros para a ocorrência de transferência metálica estável por curto-circuito foram realizadas soldas com DBCP = 12 mm. A determinação destes parâmetros envolveu as seguintes etapas:

- a. Determinação das correntes de soldagem;
- b. Determinação da influencia da Indutância e da tensão;
- c. Determinação das tensões.

a) Determinação das correntes de soldagem

A faixa de corrente para ocorrência de transferência metálica por curto-circuito foi definida por dois valores extremos e um intermediário, escolhidos de acordo com a literatura, determinando as correntes de 100, 140 e 180 A. Como na transferência por curto-circuito a fonte é operada

no modo corrente constante foram realizadas soldas utilizando a velocidade de soldagem de 30 cm/min (para permitir um tempo de aquisição de sinais elétricos de soldagem de pelo menos 20 segundos, uma vez que os corpos de prova tinham 120 mm comprimento) nas quais se ajustou uma tensão com valor arbitrado de acordo com a literatura (18 V para a corrente de 100 A e 20 V para as correntes de 140 e 180 A) e variou-se a velocidade do arame até conseguir as correntes de soldagem desejadas.

b) Determinação da Influência da Tensão versus a Indutância

Com a finalidade de determinar a influência da indutância e da tensão na variação da estabilidade no modo de transferência por curto-circuito foram realizadas soldas utilizando a velocidade de soldagem de 30 cm/min e as três velocidades de arame determinadas após realizar os ensaios descritos no item anterior (determinação das correntes de soldagem), a saber, 2,4; 3,2 e 4,3 m/min, combinadas com três níveis de tensão a serem ajustados na fonte de soldagem, arbitrados de acordo com a literatura (14, 18 e 22 V) e três níveis de “efeito indutivo” (20, 50 e 80) a serem ajustados na fonte, arbitrados de acordo com a escala de regulagem da mesma. A utilização de valores de “efeito indutivo” ao invés de indutância deve-se ao fato, já comentado neste trabalho, que em soldagem não é possível se basear somente na regulagem de um valor de indutância na fonte, pois o que importa é a indutância do sistema que depende não somente do circuito da fonte, mas também do próprio arco, cabos, etc.. Por este motivo, as fontes possuem regulagens de posições de indutância e não valores de indutância e a melhor forma de se fazer

referência à indutância de um equipamento é pelo termo “efeito indutivo”, ou seja, pelas taxas de aumento e diminuição da corrente para uma dada condição de soldagem. Assim, como nos equipamentos da IMC Soldagem o ajuste do “efeito indutivo” é realizado através das variáveis K_s e K_d que indicam respectivamente as taxas de subida e descida da corrente e têm uma relação com o inverso das indutâncias, ($K_s = 0,0036/L_s$ e $K_d = 0,0036/L_d$, onde L_s e L_d são respectivamente a indutância na subida e na descida da corrente) e na fonte DIGIPLUS A7 modelo 450, utilizada neste trabalho, são apresentadas em uma escala de 1 a 100, indicam que o “efeito indutivo” ajustado em 80 (com $K_s = K_d$), determina uma resposta mais rápida da fonte, ou seja, maior a taxa de variação da corrente (menor indutância) e que o valor ajustado em 20 (com $K_s = K_d$) determina uma resposta mais lenta da fonte (maior indutância) ou menor taxa de variação da corrente.

Durante a realização destas soldas os sinais elétricos (tensão e corrente) foram monitorados e registrados mediante o sistema de aquisição de dados SAP4. Após a realização destas soldas os parâmetros de tensão e corrente para a ocorrência de transferência estável foram identificados pela análise dos cordões e dos sinais elétricos, utilizando como critério a variabilidade da transferência metálica indicada pelo desvio padrão relativa (DPR) dos períodos de transferência metálica e dos picos de corrente, confirmados pela menor variabilidade (menor desvio padrão relativo) da geometria e da diluição destes cordões de solda.

c) Determinação das tensões

Para determinar a faixa de tensões onde ocorre transferência metálica por curto-circuito bem como a tensão em que ocorre maior estabilidade do arco e ou regularidade da transferência metálica realizou-se ensaios de isoconsumo utilizando as velocidades de soldagem de 15, 25 e 30 cm/min, três velocidades de arame (2,4; 3,2 e 4,3 m/min) determinadas após realizar os ensaios descritos no item a (determinação das correntes de soldagem) e o “efeito indutivo” ajustado no valor médio da escala do equipamento ($K_s = K_d = 50$), pois conforme os estudos realizados no item anterior (determinação da Influência da Tensão versus a Indutância) as soldas realizadas com esta regulagem de “efeito indutivo” apresentaram em geral uma transferência mais regular. Estes ensaios foram realizados da seguinte maneira, inicialmente a tensão foi ajustada em 16 V (valor arbitrado com base na literatura) e reduzida em degraus de 1 V até que a deposição do cordão tornou-se descontínua, após foram realizados ensaios em que a tensão foi novamente ajustada em 16 V porém aumentada em degraus de 1V até que ocorresse transferência pelo modo globular. Para determinar as tensões máximas e mínimas para a transferência de curto-circuito, bem como a tensão em que ocorre maior estabilidade do arco e ou regularidade da transferência metálica foram realizadas análises dos oscilogramas de tensão e corrente, considerando a variabilidade dos picos de corrente e dos períodos de transferência, também foram determinadas (calculadas) as frequências de transferências metálicas utilizando o número de picos de corrente

registrado durante a realização destes ensaios (utilizando o sistema de aquisição de dados - SAP 4).

4.2.1.2- Procedimentos para determinar os parâmetros de transferência estável pelo modo goticular.

Para determinar os parâmetros para a ocorrência de transferência metálica estável pelo modo goticular foram realizadas soldas utilizando a DBCP = 16 mm e a velocidade de soldagem de 30 cm/min. A determinação destes parâmetros envolveu as seguintes etapas:

- a) Determinação das correntes de soldagem;
- b) Determinação das tensões.

a) Determinação das correntes de soldagem

Os valores das correntes de soldagem para ocorrência de transferência goticular foram definidos por dois extremos e um valor intermediário, escolhidos com base na literatura. Desta forma foram arbitrados para correntes de soldagem os valores 280, 320 e 340 A.

Como no modo de transferência goticular a fonte também é operada no modo tensão constante, inicialmente realizou-se soldas em que se ajustou uma tensão de 30 V (escolhida com base no gráfico da Figura 3. 14) e aumentou-se a velocidade do arame a fim de determinar as velocidades necessárias para obter as correntes desejadas. Porém para esta tensão e as velocidades de arame que determinaram as correntes de 280, 320 e 340 A não aconteceu transferência pelo modo goticular, como indicou a análise visual dos oscilogramas de tensão e corrente destas soldas, assim foi necessário realizar novos ensaios para

determinar tensões para as quais ocorresse transferência goticular para os níveis de corrente desejados.

b) Determinação das tensões

Para determinar as tensões com transferência goticular para os níveis de corrente de 280, 320 e 340 A, foram realizados ensaios de isoconsumo nos quais se utilizou as velocidades de arame de 8,5; 9,5 e 10 m/min (escolhidas com base nos ensaios de determinação das correntes de soldagem) e aumentou-se a tensão até ocorrer transferência goticular. Os valores de tensão para os quais começaram ocorrer transferências metálicas pelo modo goticular foram identificados pelo valor nulo dos tempos de curto circuito e confirmados pela análise visual dos oscilogramas de tensão e corrente.

4.2.1.3- Procedimentos para determinar os parâmetros de transferência estável pelo modo pulsado.

Conforme a literatura consultada para uma dada corrente média de soldagem a determinação dos demais parâmetros e variáveis de transferência pelo modo pulsado segue uma sequência comum que pode ser resumida nas seguintes etapas:

1) Seleção da corrente de pulso acima da corrente de transição

Como apontou Scotti (SCOTTI & PONOMAREV, 2008), a magnitude da corrente de pulso I_p deve ser maior que a corrente de transição, mas não deve ser alta demais, pois, caso contrário, a ponte metálica entre a gota e o eletrodo pode acontecer com grande

elongamento, provocando curtos-circuitos com ricocheteamento antes do destacamento e/ou a separação entre gota e eletrodo pode ocorrer de forma violenta, devido às altíssimas forças eletromagnéticas e ambos os casos resultam em respingos. De outra parte, para uma mesma corrente média, quanto maior a I_p , maior a penetração.

2) Determinação do tempo de pulso

O tempo de pulso t_p determina o número das gotas que podem ser formadas e destacadas durante o pulso de corrente. A literatura em geral admite que um melhor controle da transferência seja obtido com o destacamento de uma gota, com diâmetro próximo ao do eletrodo, a cada pulso da corrente (UGPP). Diversos autores, (NIXON & NORRISH, 1988), (DUTRA, 1989), (ALLUM, 1983) e (AMIN M. , 1981) verificaram que uma gota é destacada a cada pulso de corrente, se:

$$I_p^n \cdot t_p = D \quad (4.1)$$

Sendo n um valor relacionado ao tipo e ao diâmetro do eletrodo e D uma constante denominada de parâmetro de destacamento para um diâmetro de gota específico. Essa relação entre I_p e t_p é determinada experimentalmente e tem a forma das curvas da Figura 4. 1.

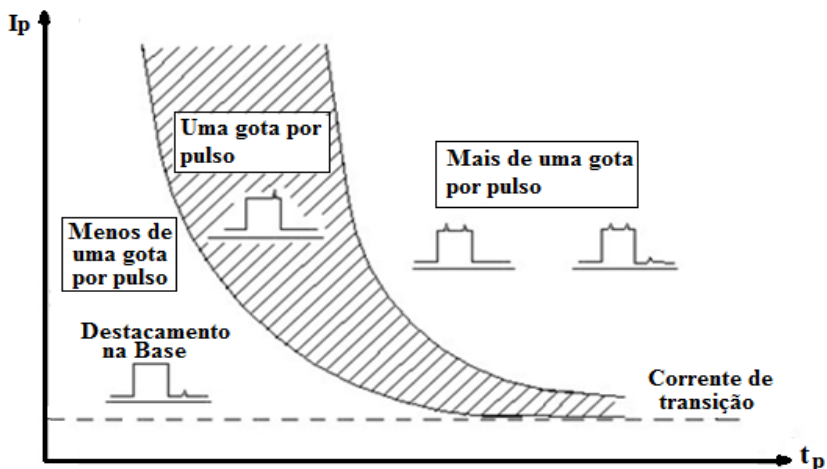


Figura 4. 1 - Regiões de relacionamento entre corrente e tempo de pulso e as respectivas condições de transferência metálica (ALLUM, 1983).

3) Determinação da velocidade do arame (V_a)

Deve ser determinada a partir de equação ou gráfico que relacione velocidade de arame (V_a) e corrente média (I_m), uma das equações que podem ser utilizadas para encontrar a velocidade do arame é:

$$V_a = k.I_m \quad (4.2)$$

Em que a Velocidade de alimentação do arame é determinada em função da corrente média e da constante K . Em uma primeira aproximação, o valor desta constante pode ser obtido realizando soldas com MIG/MAG convencional em diferentes correntes médias, utilizando-se o mesmo arame-eletrodo e distancia bico de contato peça similar. Com os valores obtidos traça-se um gráfico da velocidade de alimentação do arame versus a corrente média de soldagem, o valor da constante K é a inclinação da linha de tendência destes pontos.

4) Cálculo do período de onda da corrente pulsada

O período de tempo (T) da onda retangular de uma corrente pulsada que causa o destacamento de uma gota, de volume constante, a cada pulso da corrente, pode ser estimado a partir de uma relação que considera o volume de arame que avança durante esse período e o volume da gota que será formada. Esse relacionamento pode ser demonstrado e a equação é da seguinte forma:

$$T = \frac{40 \cdot d_g^3}{v_a d_e^2} \quad (4.3)$$

Sendo d_g o diâmetro da gota (em mm), V_a a velocidade do arame (em m/min), d_e o diâmetro do eletrodo (em mm) e T o período (em ms). O período da onda, de acordo com a equação anterior é dependente do diâmetro da gota pretendido e da velocidade do arame. Embora possa ser verificado experimentalmente, o valor indicado para o diâmetro da gota sempre será próximo do diâmetro do arame-eletrodo e não deverá ser menor que este ou superior a 30% deste. Experiências realizadas no LABSOLDA indicam que a escolha do diâmetro da gota com valor 20% acima do diâmetro do arame satisfaz as aplicações com os arames utilizados neste trabalho (AWS ER70S-6 e AWS E71T-1).

5) Determinação do tempo de base pela relação

$$T = t_p + t_b \quad (4.4)$$

Ou seja, $t_b = T - t_p$, onde t_b é o tempo de base, T é o período de onda e t_p é o tempo de pulso.

6) Cálculo da variável I_b , a partir da equação da corrente média

A equação para calcular a corrente média para uma onda de formato retangular é a seguinte:

$$I_m = \frac{(I_p.t_p + I_b.t_b)}{T} \quad (4.5)$$

Esse procedimento pode ser empregado para determinar as variáveis do modo pulsado em toda faixa de corrente média, recomendada para um determinado arame. Desta forma os cálculos das variáveis para soldar com arame maciço com 1,2 mm de diâmetro, são mostrados no apêndice A e os valores apresentados na Tabela 5. 12 do capítulo de resultados e discussões. Os cálculos das variáveis para soldar com arame tubular com 1,2 mm de diâmetro são mostrados no apêndice B, e os valores apresentados na Tabela 5. 13 do capítulo de resultados e discussões.

4.2.2- Variabilidade em soldas Automáticas

Com a finalidade de determinar como alterações nas condições de soldagem afetam a variabilidade da diluição e da geometria dos cordões das soldas realizadas de forma automática foram realizados três conjuntos de ensaios com o processo MIG/MAG e três com arame tubular. No primeiro conjunto de ensaios com os processos MIG/MAG e arame tubular para as soldas realizadas com transferências pelos modos curto-circuito e goticular utilizou-se diferentes velocidades do arame (V_a) e para as soldas realizadas com transferências pelo modo pulsado, utilizou-se diferentes correntes médias (I_m), com a finalidade de

investigar como diferentes níveis de corrente de soldagem afetam a variabilidade dos cordões de solda realizados com estes modos de transferência metálica. No segundo e terceiro conjuntos de ensaios, tanto para o processo MIG/MAG quanto para o tubular realizou-se soldas com diferentes valores de distância bico de contato peça (DBCP) e com diferentes valores de velocidade de soldagem (VS) com o objetivo de investigar como a variação nestes fatores afeta a variabilidade dos cordões de solda realizados com os dois tipos de arame e os três modos de transferência metálica utilizados neste estudo. Todas estas soldas foram realizadas utilizando a técnica de simples deposição sobre chapa, a velocidade de soldagem de 30 cm/min e as condições de soldagem indicadas na Tabela 4. 1.

Para estimar a variabilidade das soldas realizadas nestes seis conjuntos de ensaios foram definidas como respostas a serem analisadas a penetração (P), a convexidade (C) e a diluição (D). Para obter estas respostas foram retiradas cinco amostras de cada cordão, por cortes transversais espaçados em 10 mm e igualmente distribuídos em relação à metade do cordão como indicado na Figura 4. 2.

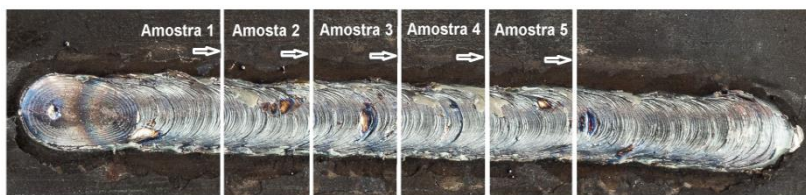


Figura 4. 2 - Localização das cinco amostras (seções) retiradas de cada cordão de solda.

Nestas amostras foram realizados ensaios macrográficos. Após estas macrografias serem fotografadas, utilizando o software de processamento e análise de imagens (Image Tool) foram medidas a

largura, o reforço, a penetração, a área de reforço e a área de penetração de cada uma das amostras na forma como indicada na Figura 4. 3.

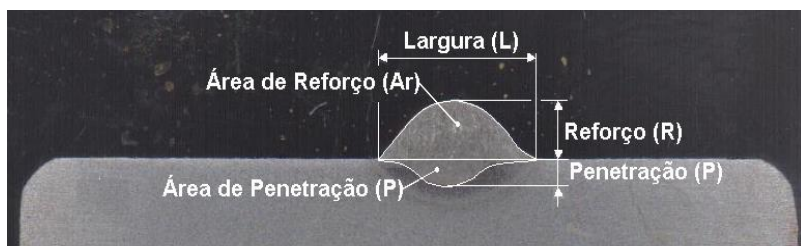


Figura 4. 3 - Forma de medição dos parâmetros geométricos.

A diluição de cada amostra foi calculada a partir dos valores da área de reforço e da área de penetração medidas na etapa anterior, utilizando-se a seguinte equação:

$$\text{Diluição: } D = \frac{A_p}{A_r + A_p} \cdot 100 \quad (4.6)$$

Onde A_r é a área de reforço e A_p é a área de penetração.

O índice de convexidade (C) foi calculado da forma como indicou Paiva, (PAIVA, et. al., 2010) com as medidas da altura do reforço e da largura do cordão utilizando a seguinte equação:

$$\text{Índice de convexidade: } C = \frac{R}{L} \cdot 100 \quad (4.7)$$

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

Após determinados os valores da penetração, da convexidade e da diluição de cada uma das cinco seções em cada cordão de solda foram calculadas a média, o desvio padrão e o desvio padrão relativo de cada uma destas respostas para cada um dos cordões de solda realizados. Finalmente para comparar a variabilidade dos cordões de solda realizados de forma automática foram plotados em gráficos os valores do desvio padrão relativo (indicativo da variabilidade) da penetração, da convexidade e da diluição destes cordões de solda.

4.2.3- Variabilidade em soldas Semiautomáticas

Com a finalidade de investigar como alterações nas condições de soldagem afetam a variabilidade da diluição e da geometria dos cordões de solda realizados de forma semiautomática, foram realizadas soldas utilizando os modos de transferência curto-circuito, goticular e pulsado.

As soldas foram realizadas por um soldador com qualificação nos processos MIG/MAG e arame tubular. Para realizar estas soldas procurou-se utilizar parâmetros de soldagem similares aos das soldas realizadas de modo automático. Também se procurou monitorar e registrar a variação da distância bico de contato peça (DBCP) e da velocidade de soldagem, assim no item a seguir é descrita a metodologia utilizada para este fim.

4.2.3.1- Metodologia para determinar a variação da DBCP e da Velocidade de Soldagem das soldas semiautomáticas

Para determinar a variação da distância bico de contato peça (DBCP) e da velocidade de soldagem das soldas realizadas de forma semiautomática foram monitorados e registrados os deslocamentos

verticais e horizontais da tocha. Com os registros dos deslocamentos verticais foram calculadas as distâncias bico de contato peça (utilizando a expressão 4.9) e com os registros dos deslocamentos horizontais foram calculadas as velocidade de soldagem (utilizando a expressão 4.8). Após, foram calculados o valor médio e a variação (desvio padrão) da DBCP e da velocidade de soldagem.

Para monitorar os deslocamentos horizontais da tocha utilizou-se o esquema apresentado na Figura 4. 4, composto por um sensor de posição do tipo potenciômetro eletrônico com curso 200 mm e saída 0-10V com indicação de 20 mm/V (sinal de avanço), conectado a uma fonte de corrente contínua de 24V e a placa de aquisição de sinais da marca National Instruments e modelo NI USB-6009 com configuração da entrada de $\pm 10V$ “single ended”, com resolução de entrada de 13bits, na faixa de leitura de $\pm 10V$ “single ended”(como indica o manual encontrado no site <http://www.ni.com/pdf/manuals/371303m.pdf>) e resolução de saída de 2,44mV o que resultou em uma resolução do sistema de medição de deslocamento horizontal de 0,048 mm.

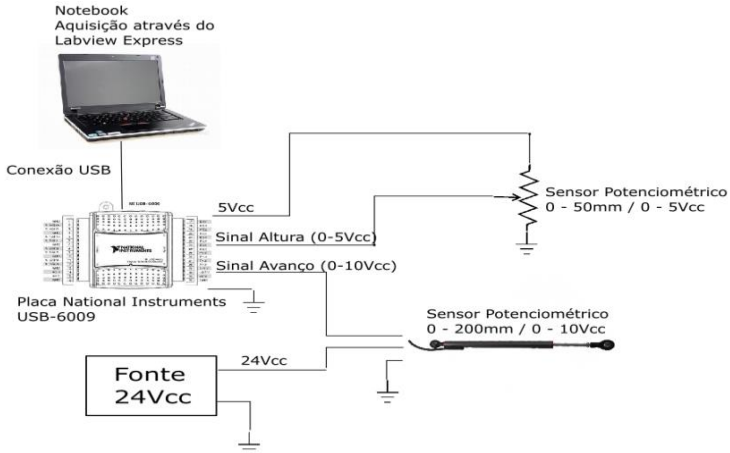


Figura 4. 4 - Representação esquemática do circuito para monitoração e registro dos deslocamentos da tocha.

Para monitorar os deslocamentos verticais da tocha utilizou-se um dispositivo composto por um potenciômetro linear com curso de 50 mm e saída 0-5 V (sinal de altura), comandado por uma haste deslizante com retorno por mola apoiada em uma chave de fim de curso com rolete metálico (Figura 4. 5). Este potenciômetro por sua vez foi conectado a placa de aquisição de sinais utilizando a referência de tensão interna da mesma (vide esquema apresentado na Figura 4. 4). Como este sensor de deslocamento que apresenta uma indicação de 9,09 mm/V também estava conectado a placa de aquisição NI USB-6009 que apresenta a resolução de saída de 2,44mV resultou em uma resolução do sistema de medição do deslocamento vertical de 0,022 mm. Para monitorar e registrar os sinais de avanço (deslocamentos horizontais) e os sinais de altura (deslocamentos verticais) conectou-se a placa de aquisição a um notebook e utilizou-se o software de aquisição e registro de sinais Labview Signal Express, como mostra o esquema da Figura 4. 4.

De acordo com o que escreveu Albertazzi (ALBERTAZZI & SOUSA, 2008), o método utilizado para medir os deslocamentos horizontais da tocha pode ser considerado como método da indicação, pois o incremento do sinal de tensão deste sistema de medição devido ao deslocamento da haste do potenciômetro é proporcional ao deslocamento da tocha. Da mesma forma o método para medir os deslocamentos verticais pode ser considerado como método diferencial, pois a variação da distancia do bico de contato peça foi determinada a partir da variação do valor da tensão em relação ao valor da tensão de referência obtido ao encostar o bocal da tocha em um bloco com 7 mm de altura (apresentado na Figura 4. 5) o que resultou em uma DBCP de 12 mm (devido ao recuo do bico de contato com valor 5 mm) utilizado ao soldar pelo modo curto-circuito, e também em relação ao valor da tensão de referência obtido ao encostar o bocal da tocha em um bloco com 11 mm o que resultou em uma DBCP de 16 mm ao soldar pelos modos goticular e pulsado.

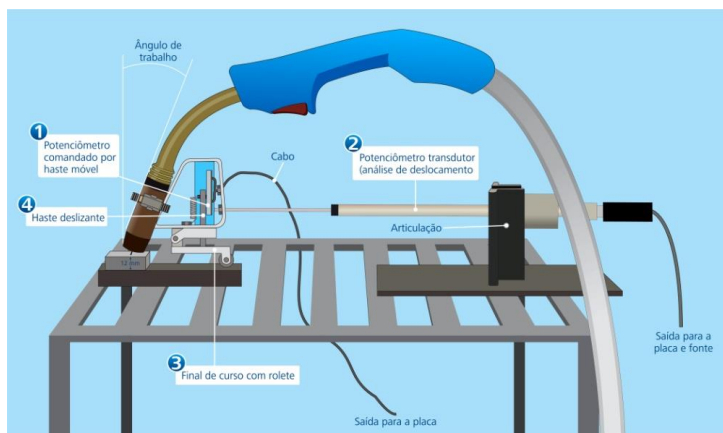


Figura 4. 5 - Representação esquemática do sistema para monitoração dos deslocamentos da tocha.

Para calcular as velocidades de soldagem, a partir dos valores dos sinais do sensor de deslocamento horizontal da tocha (sensor de posição) que foram registrados com intervalos de tempo de 1 segundo, utilizou-se a seguinte expressão:

$$Vs = \left(\frac{d2-d1}{t} \right) \times 60 \quad (4.8)$$

Onde: Vs = velocidade de soldagem em metros por minuto (cm/min)

t = 1 s (intervalo de tempo para aquisição dos sinais)

d1 = distância inicial em cada intervalo de tempo (mm)

d2 = distância final em cada intervalo de tempo (mm)

Da mesma forma para calcular os valores da distância bico de contato peça (DBCP) a partir dos sinais do sensor de deslocamento vertical da tocha utilizou-se a seguinte expressão:

$$DBCP = DBCP_{ref} + (U_l - U_{ref}) \times K_1 \quad (4.9)$$

Onde: DBCP = distância bico de contato peça em milímetros (mm)

$DBCP_{ref}$ = DBCP de referência (mm).

U_l = tensão lida (V)

U_{ref} = tensão de referência (V)

K₁ = $DBCP_{ref}$ / tensão de referência (mm / V).

Para aferir o sistema de medição dos deslocamentos verticais foram realizadas medições (com cinco repetições) em um gabarito com espessuras de 12; 17 e 25 mm, formado por chapas dispostas da forma como indicada na Figura 4.6, as diferenças entre os valores destas medidas e as espessuras do gabarito indicaram um erro de 2,76%.

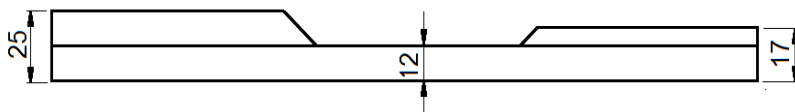


Figura 4. 6 – Gabarito para aferição do sistema de medição dos deslocamentos verticais.

Para aferir o sistema de medição dos deslocamentos horizontais mediu-se o deslocamento da tocha ao movimentar a mesma de forma automática utilizando velocidades reguladas em 20, 30, 35 e 60 cm/min, realizando cinco repetições para cada velocidade. O cálculo das velocidades a partir dos valores dos deslocamentos medidos com o sistema de medições dos deslocamentos horizontais indicou um erro de 5,03% em relação às velocidades reguladas no sistema de deslocamento automático (tartaruga).

Para determinar a variabilidade das características geométricas das soldas realizadas de forma semiautomática foi utilizada mesma metodologia empregada para determinar a variabilidade das características geométricas soldas realizadas de forma automática.

5- RESULTADOS E DISCUSSÕES

Neste capítulo inicialmente, são apresentados os resultados dos ensaios para determinar os parâmetros para ocorrência de transferência estável dentro de cada região de transferência metálica de interesse, a saber, curto-circuito, goticular e pulsado. Na sequência são apresentados os resultados dos ensaios para determinar a variabilidade em soldas realizadas de modo automático. Após são apresentados os resultados dos ensaios para determinar a variabilidade em soldas realizadas de modo semiautomático. Finalmente são comparadas as variabilidades das soldas realizadas de modo semiautomático e modo automático.

5.1- PARÂMETROS PARA TRANSFERÊNCIA ESTÁVEL

5.1.1- Parâmetros de Transferência Estável por Curto-Circuito

Conforme já comentado no procedimento experimental os ensaios para determinar os parâmetros para ocorrência de transferência estável por curto-circuito envolveram as seguintes etapas:

- a) Determinação das correntes de soldagem;
- b) Determinação da influencia da Indutância e da tensão;
- c) Determinação das tensões.

a) Correntes de Soldagem

Como na transferência por curto-circuito a fonte é operada com tensão constante foi necessário realizar soldas com variação da velocidade do arame até conseguir as correntes desejadas (100, 140 e

180 A). Assim, para determinar a velocidade de arame necessária para obter a corrente de soldagem de 100 A, realizou-se soldas com variação da velocidade de arame, tensão ajustada em 18 V (valor arbitrado tendo como referencia o Mapa de transferência metálica da Figura 3. 13) e o “efeito indutivo” ajustado no valor médio da escala de regulagem do equipamento ($K_d = K_s = 50$). A leitura dos sinais de corrente e tensão destas soldas indicou uma corrente média próxima a 100 A (101,9 A) com tensão média de 17,8 V para uma velocidade de arame de 2,4 m/min (vide valores destacados em negrito na Tabela 5. 1). Da mesma forma para determinar as velocidades de arame necessárias para obter as correntes de soldagem de 140 e 180 A, realizaram-se soldas com variação da velocidade de arame e tensão ajustada em 20 V (valor também arbitrado tendo como referencia o mapa da Figura 3. 13) e o “efeito indutivo” também ajustado no valor médio da escala de regulagem da fonte. A leitura dos sinais de corrente e tensão destas soldas indicou correntes médias de soldagem próximas a 140 e 180 A para as velocidades de arame de respectivamente 3,2 e 4,3 m/min, com tensões médias lidas de 19,9 V (vide valores em negrito na Tabela 5. 2).

Tabela 5. 1 - Velocidade de arame versus corrente e tensão médias, com tensão ajustada em 18 V.

Va (m/min)	Im (A)	Um (V)
2,2	87,0	17,8
2,3	94,2	17,8
2,4	101,9	17,8
2,5	105,1	17,8

Va =velocidade do arame (ajustada), Im =corrente média (lida), Um =tensão média (lida).

Tabela 5. 2 - Velocidade de arame versus corrente e tensão médias, com tensão ajustada em 20 V.

Velocidade do Arame Va (m/min)	Corrente Média Im (A)	Tensão Média Um (V)
3,1	138,5	19,9
3,2	140,8	19,9
3,3	142,5	19,9
3,4	145,1	19,9
3,5	149,9	19,9
3,6	153,7	19,9
3,7	157,7	19,9
3,8	161,3	19,9
3,9	166,7	19,9
4,0	170,2	19,9
4,1	173,7	19,9
4,2	175,1	19,9
4,3	180,5	19,9
4,4	182,5	19,9
4,5	186,7	19,9

Va = velocidade do arame (ajustada), Im = corrente média e Um = tensão média (lidas).

b) Determinação da Influência da Tensão versus a Indutância

Com a finalidade de determinar a influência da indutância e da tensão na variação da estabilidade no modo de transferência por curto-circuito foram realizadas soldas combinado as três velocidades de arame (determinadas após realizar os ensaios descritos no item a), três níveis de tensão (arbitrados de acordo com a literatura) e três níveis de “efeito indutivo” (arbitrados de acordo com a escala de regulagem da fonte de soldagem), na forma como indicada na Tabela 5. 3.

Tabela 5. 3- Velocidade de arame versus tensão ajustada e “efeito indutivo”.

Va (m/min)	Uaj (V)	“Efeito Indutivo”
2,4	14	20
		50
		80
	18	20
		50
		80
	22	20
		50
		80
3,2	14	20
		50
		80
	18	20
		50
		80
	22	20
		50
		80
4,3	14	20
		50
		80
	18	20
		50
		80
	22	20
		50
		80

Os resultados destes ensaios mostraram que embora para um determinado valor de tensão e velocidade de arame as soldas realizadas com os três diferentes níveis de “efeito indutivo” apresentassem visualmente boa regularidade na geometria do cordão o que indicaria que a indutância tem pouca influência sobre regularidade, nas soldas com menor variabilidade (desvio padrão relativo) dos picos de corrente

e dos períodos de transferência metálica também ocorreram menor variabilidade da geometria e da diluição dos cordões de solda.

Como mostram, por exemplo, os resultados dos ensaios realizados com velocidade de arame de 2,4 m/min, dos quais são apresentados, na Figura 5. 1, as fotografias dos cordões de solda obtidos e ainda que todos estes cordões apresentem visualmente boa aparência indicando, a princípio, que a indutância tem pouca influência sobre a regularidade das transferências, foi possível verificar que a condição de transferência com maior regularidade foi obtida com “efeito indutivo” ajustado no meio da faixa disponível na fonte de soldagem ($K_s = K_d = 50$). Pois, como se pode observar, por exemplo, na Tabela 5. 4 (vide valores destacados em negrito) para as soldas realizadas com velocidade de arame de 2,4 m/min e tensão regulada em 18 V as variabilidades (desvios padrão relativos) da penetração, da convexidade e da diluição foram menores para as soldas realizadas com “efeito indutivo” 50.

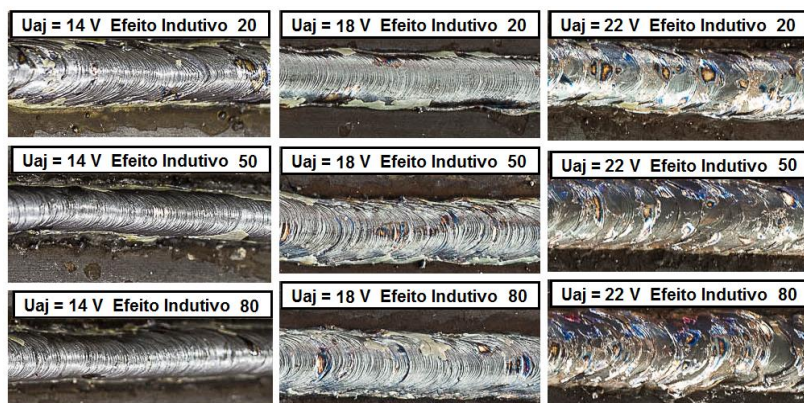


Figura 5. 1 - Fotos das soldas dos ensaios de tensão versus “efeito indutivo” com $V_a = 2,4$ m/min.

Tabela 5. 4 – Variabilidade das soldas realizadas com $V_a = 2,4$ m/min, $U_{aj} = 18$ V.

"Efeito indutivo"	Desvio Padrão Relativo %		
	Penetração	Convexidade	Diluição
20	20,53	18,66	12,63
50	8,53	6,45	6,03
80	10,61	9,20	8,18

Estes resultados confirmam o que já tinha sido constatado ao examinar trechos dos oscilogramas de tensão e corrente destas soldas, ou seja, que a condição de transferência com maior regularidade foi obtida com “efeito indutivo” igual a 50. Pois como mostram, por exemplo, os oscilogramas das soldas realizadas com velocidade de arame 2,4 m/min e tensão regulada em 18 V (vide Figura 5. 2, Figura 5. 3 e Figura 5. 4) com o “efeito indutivo” 50 as variabilidades (desvios padrão relativos) dos períodos de transferência e dos picos de corrente calculados com base em intervalos de tempo de 10 s (com a solda em condições de regime) foram menores (desvios padrão relativos de 2,3 % e 4,4 %,) que as variabilidades das soldas realizadas com $K_s = K_d = 20$ (desvios padrão relativos de 34,9 % e 28,3 %) e com $K_s = K_d = 80$ (47,0 % e 16,0 %). Assim, os resultados indicam que os parâmetros desvio padrão relativo dos picos de corrente e dos períodos de transferência metálica são eficazes e altamente sensíveis para quantificar a estabilidade da transferência metálica. Desta maneira, como mostram os resultados das soldas realizadas com $V_a = 2,4$ m/min e tensões ajustadas em 14 e 22 V as transferências metálicas com maior regularidade também foram obtidas com “efeito indutivo” igual a 50, pois com este “efeito indutivo” ocorreram as menores variabilidades

(desvios padrão relativos) dos períodos de transferência e dos picos de corrente, vide os valores destacados em negrito na Tabela 5. 5.

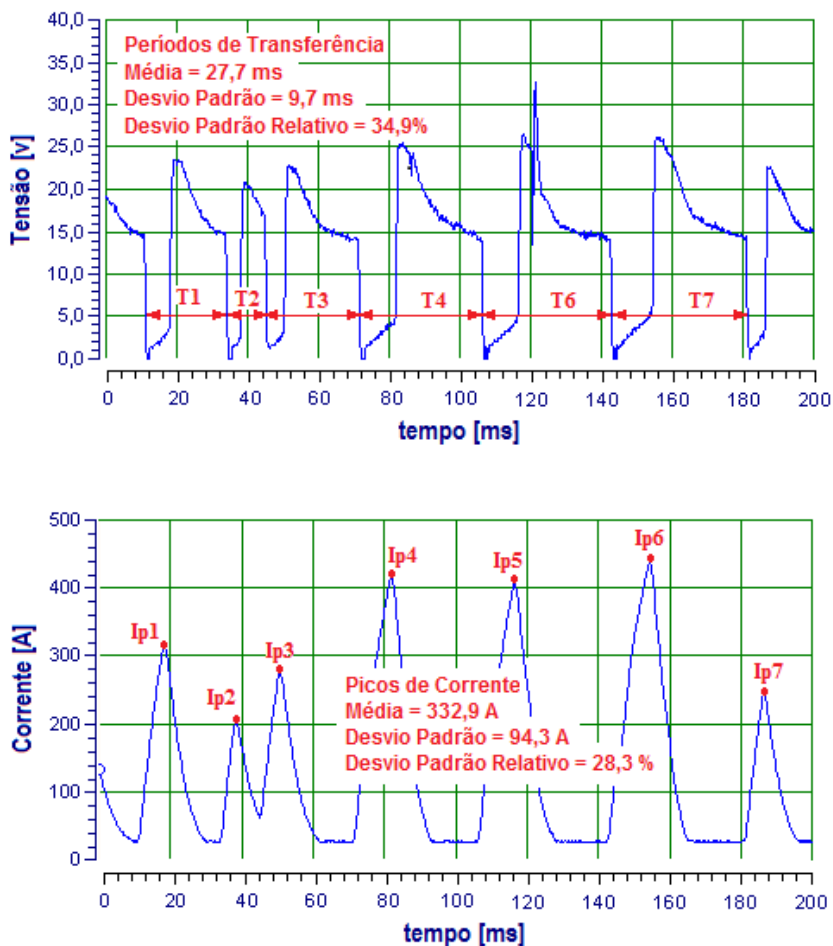


Figura 5. 2 - Oscilogramas das soldas realizadas com $V_a = 2,4$ m/min, $U_{aj} = 14$ V e “efeito indutivo” 20.

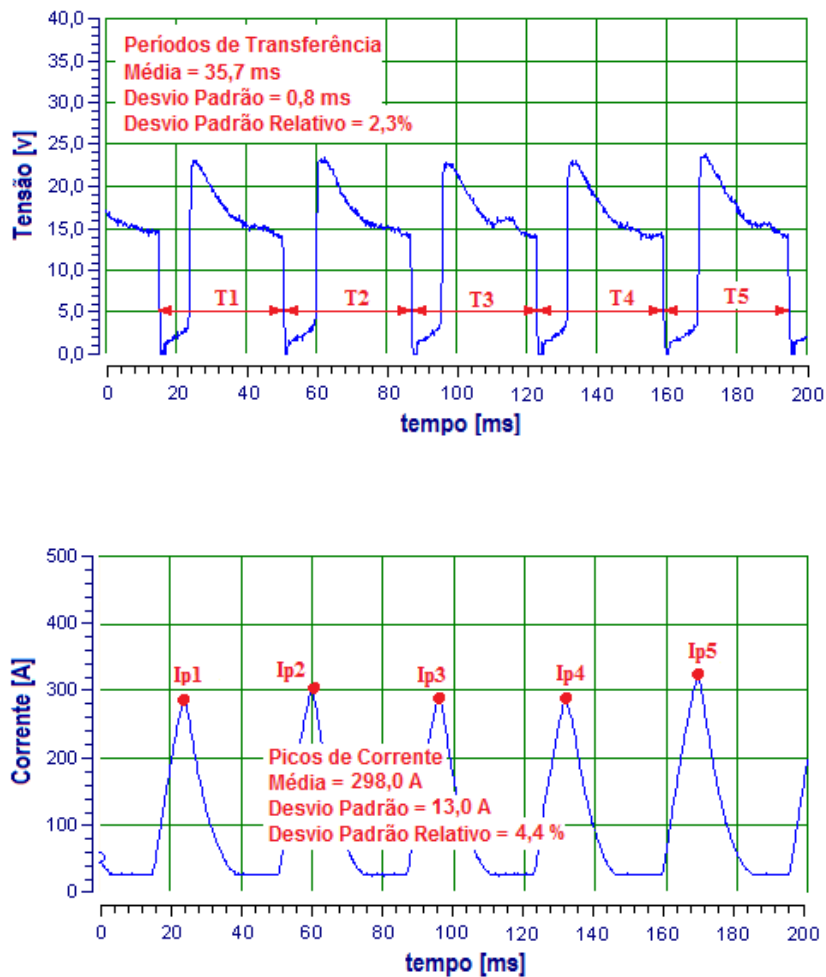


Figura 5. 3 - Oscilogramas das soldas realizadas com $V_a = 2,4$ m/min, $U_{aj} = 14$ V e “efeito indutivo” 50.

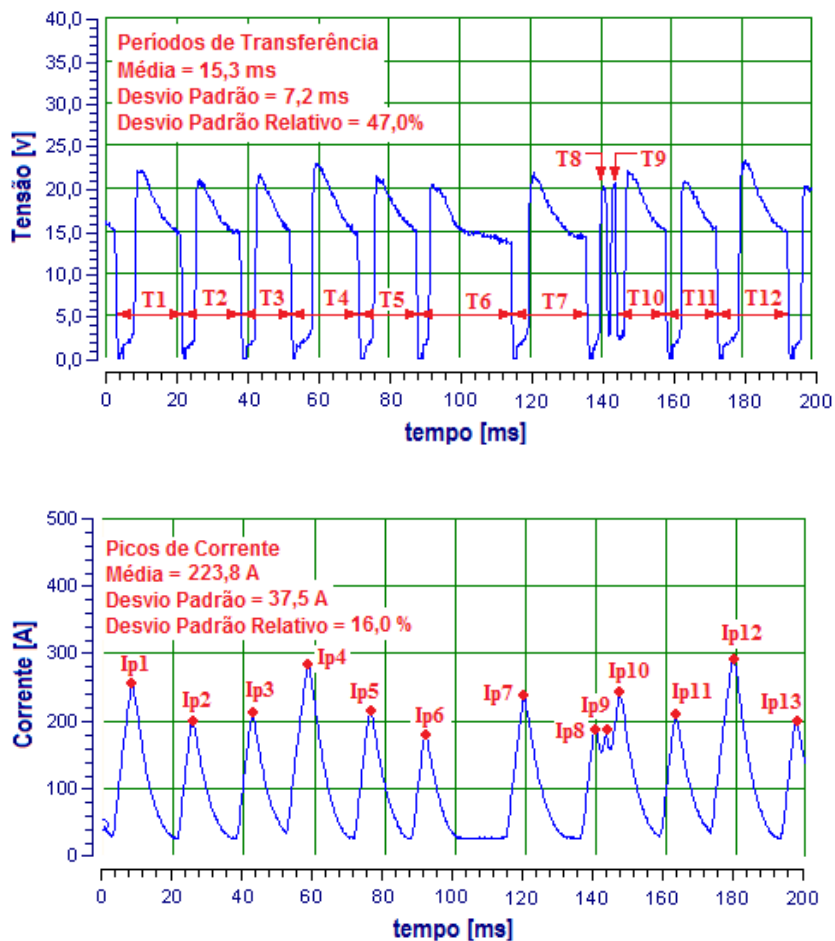


Figura 5. 4 - Oscilogramas das soldas realizadas com $V_a = 2,4$ m/min, $U_{aj} = 14$ V e “efeito indutivo” 80.

Tabela 5. 5 - Variabilidade das soldas dos ensaios de tensão versus “efeito indutivo” com $V_a = 2,4$ m/min.

U _{aj} (V)	“Efeito Indutivo”	Desvios Padrão Relativos (%)	
		I _p	T
14	20	28,3	34,9
	50	4,4	2,3
	80	47,0	16,0
18	20	9,3	21,1
	50	9,0	16,9
	80	9,3	23,3
22	20	17,9	44,6
	50	5,7	17,8
	80	6,9	25,4

I_p = pico de corrente e T = período de transferência.

Nas fotografias dos cordões de solda obtidos com velocidade de arame de 3,2 m/min (apresentados, na Figura 5. 5) observa-se que todos os cordões apresentam aparência regular, com exceção da solda realizada com tensão ajustada em 14 V e “efeito indutivo” ajustado em 20, condição na qual não houve formação do cordão e que também apresentou um elevado desvio padrão relativo (variabilidade) do período de transferência metálica (vide valor em negrito na Tabela 5. 6).

Para esta tensão (14 V) a variabilidade da transferência metálica, indicada pelo desvio padrão relativo dos períodos de transferência metálica e dos picos de corrente, foi menor para o “efeito indutivo” ajustado em 80 (vide valores destacados em negrito na Tabela 5. 6). Nas soldas realizadas com tensão ajustada em 18 V a variabilidade da transferência metálica, indicada pelo desvio padrão relativo dos períodos de transferência metálica e dos picos de corrente, foi menor para o “efeito indutivo” ajustado em 50 (vide valores destacados em negrito na Tabela 5. 6). Da mesma maneira nas soldas realizadas com tensão

ajustada em 22 V a variabilidade da transferência metálica foi menor para o “efeito indutivo” 20 (vide valor em negrito na Tabela 5. 6).

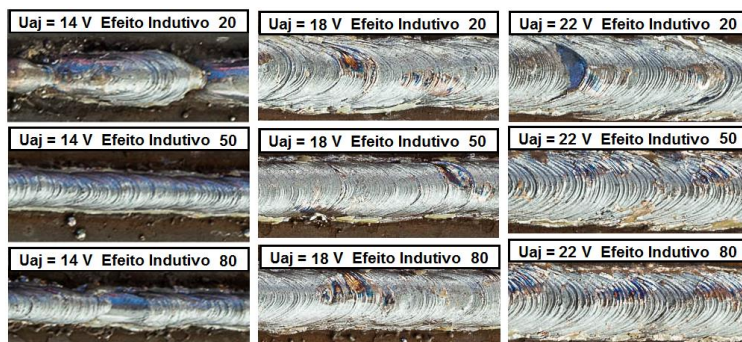


Figura 5. 5 - Fotos das soldas dos ensaios de tensão versus “efeito indutivo” com $V_a = 3,2$ m/min.

Tabela 5. 6 - Variabilidade das soldas dos ensaios de tensão versus “efeito indutivo” com $V_a = 3,2$ m/min.

Uaj (V)	Efeito Indutivo	Desvios Padrão Relativos (%)	
		Ip	T
14	20	26,8	85,1
	50	29,0	41,9
	80	25,5	35,1
18	20	11,6	42,0
	50	8,9	21,6
	80	10,1	22,1
22	20	8,5	25,2
	50	17,9	49,8
	80	14,9	41,2

Nota: Ip = pico de corrente e T = período de transferência.

Nas fotografias dos cordões de solda obtidos com velocidade de arame de 4,3 m/min (apresentados na Figura 5. 6) observa-se que para a solda realizada com tensão ajustada em 14 V e “efeito indutivo” ajustado em 80 formou-se um cordão com reforço excessivo, para as

soldas realizadas com efeitos indutivos ajustados em 20 e 50 não houve formação dos cordões ocorrendo também elevada variabilidade nos períodos de transferência metálica (vide valores destacados em negrito na Tabela 5.7). Nas soldas realizadas com tensões ajustadas em 18 e 22 V todos os cordões apresentaram aparência regular (vide Figura 5. 6), mas o desvio padrão relativo (variabilidade) dos períodos de transferência metálica e dos picos de corrente foi menor para as soldas realizadas com “efeito indutivo” 50 (valores em negrito na Tabela 5.7).

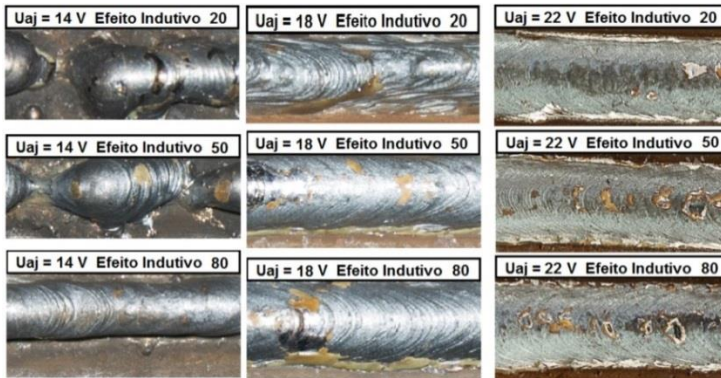


Figura 5. 6 - Fotos das soldas dos ensaios de tensão versus “efeito indutivo” com $V_a = 4,3$ m/min.

Tabela 5. 7 - Variabilidade das soldas realizadas nos ensaios de tensão versus “efeito indutivo” com $V_a = 4,3$ m/min.

Uaj (V)	Efeito Indutivo	Desvios Padrão Relativos (%)	
		Ip	T
14	20	15,2	134,4
	50	22,6	107,4
	80	24,2	41,1
18	20	31,3	77,3
	50	16,2	32,2
	80	18,6	50,6
22	20	8,8	46,3
	50	6,1	26,5
	80	7,8	29,2

Nota: Ip = pico de corrente e T = período de transferência.

Ainda no gráfico apresentado na Figura 5.7 onde foram plotados os valores da corrente média em função do “efeito indutivo” e da tensão, observa-se que para as velocidades de arame e níveis de tensão utilizados o aumento dos valores do “efeito indutivo”, ou seja, a diminuição da indutância ou aumento da taxa de variação da corrente determinou a redução da corrente média, estando estes resultados de acordo com o indicado na literatura.

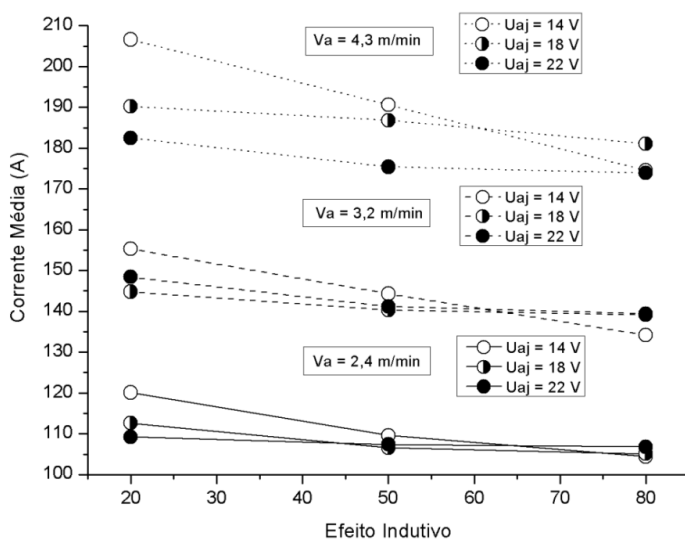


Figura 5. 7 - Corrente Média em função da tensão e do “efeito indutivo”.

c) Determinação das Tensões

As frequências de transferências metálicas resultantes dos ensaios de isoconsumo realizados com as velocidades de arame de 2,4; 3,2 e 4,3 m/min e as velocidades de soldagem de 15, 25 e 30 cm/min (150, 250 e 300 mm/min) foram determinadas (calculadas) a partir da quantidade de

picos de corrente por segundo registrados durante a realização dos ensaios de isoconsumo (utilizando o sistema de aquisição de dados SAP 4) e estão mostradas nas tabelas do apêndice C. Como já citado na revisão da literatura a frequência tem uma tendência de crescer até um máximo e cair continuamente para maiores valores de tensão de soldagem. Para uma frequência abaixo de 15 gotas por segundo há grandes possibilidades das gotas serem grosseiras, ou seja, o processo estar operando num modo combinado conhecido como globular/curto-circuito. A construção dos gráficos que mostram a relação que existe entre a frequência de transferência e a tensão ajustada na fonte de soldagem (gráficos da Figura 5. 8, Figura 5. 9 e

Figura 5. 10) permitiu identificar a faixa de correntes em que ocorre transferência por curto-circuito, transferência mista (curto-circuito e globular) e transferência globular. Na Figura 5. 8, que corresponde aos ensaios com velocidade de arame de 2,4 m/min, os limites dessas faixas são facilmente identificáveis: na transferência globular, a taxa de transferência é muito pequena (menor que 5 gotas/segundo), enquanto que para a transferência por curto-circuito é muito maior (mais de 15 gotas/segundo). Há uma faixa com taxas intermediárias, que corresponde à transferência mista (globular e curto-circuito).

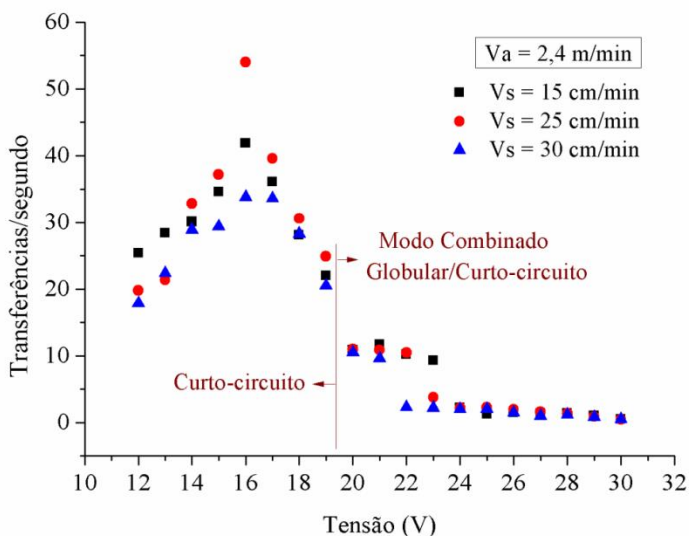


Figura 5. 8 - Frequência de transferência metálica versus a tensão ajustada, para $V_a = 2,4 \text{ m/min}$.

Nos gráficos elaborados para maiores velocidades de arame, torna-se mais difícil identificar a faixa de transferência mista. Para a velocidade de arame $3,2 \text{ m/min}$ (Figura 5.9) parece estar entre 23 e 27 V. Para a velocidade de arame de $4,3 \text{ m/min}$ (Figura 5. 10) a faixa começa com 27 V e seu limite superior parece ultrapassar 30 V.

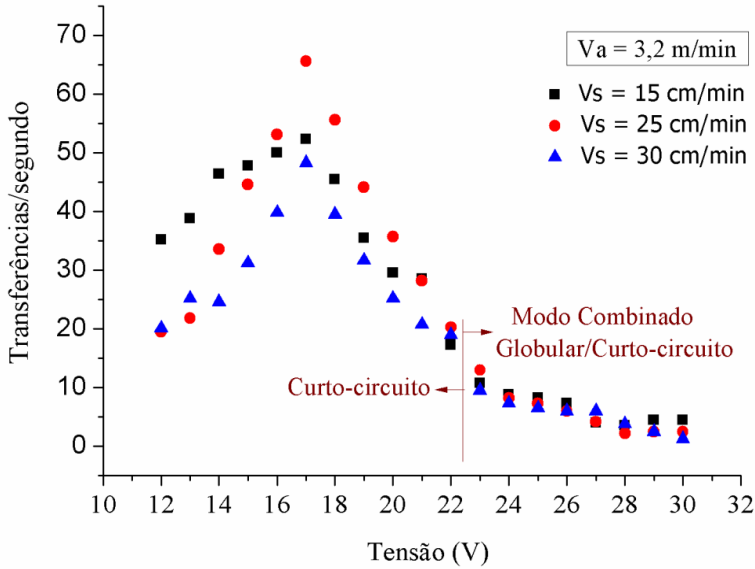


Figura 5. 9 - Frequência de transferência metálica versus a tensão ajustada, para $V_a = 3,2 \text{ m/min}$.

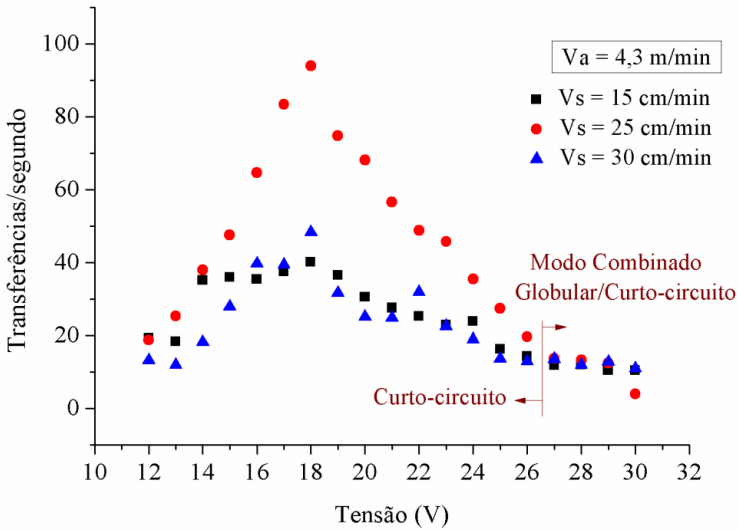


Figura 5. 10 - Variação da frequência de transferência metálica com a tensão ajustada, para $V_a = 4,3 \text{ m/min}$.

Estes modos de transferência foram adicionalmente conferidos com os oscilogramas de corrente e de tensão. Por exemplo, pelos oscilogramas da Figura 5. 11, Figura 5. 12 e Figura 5. 13 é possível verificar que nas soldas realizadas com velocidade de soldagem de 30 cm/min, velocidade de arame de 3,2 m/min e DBCP = 12 mm, ao utilizar U_{aj} de 12, 17 e 19 V a transferência foi por curto-circuito, com a melhor condição de estabilidade para $U_{aj} = 17$ V. Ao examinar ainda os oscilogramas das soldas realizadas com a velocidade de arame 3,2 m/min observou-se que as soldas realizadas com tensões ajustadas com valores maiores que 22 V apresentaram transferência pelo modo misto globular/curto-circuito. Como se observa, por exemplo, nos oscilogramas apresentados na Figura 5. 14 referentes à solda realizada com $U_{aj} = 27$ V nos quais a transferência foi mista, globular a maior parte do tempo, com um curto-circuito ocorrendo no tempo $t = 1$ s.

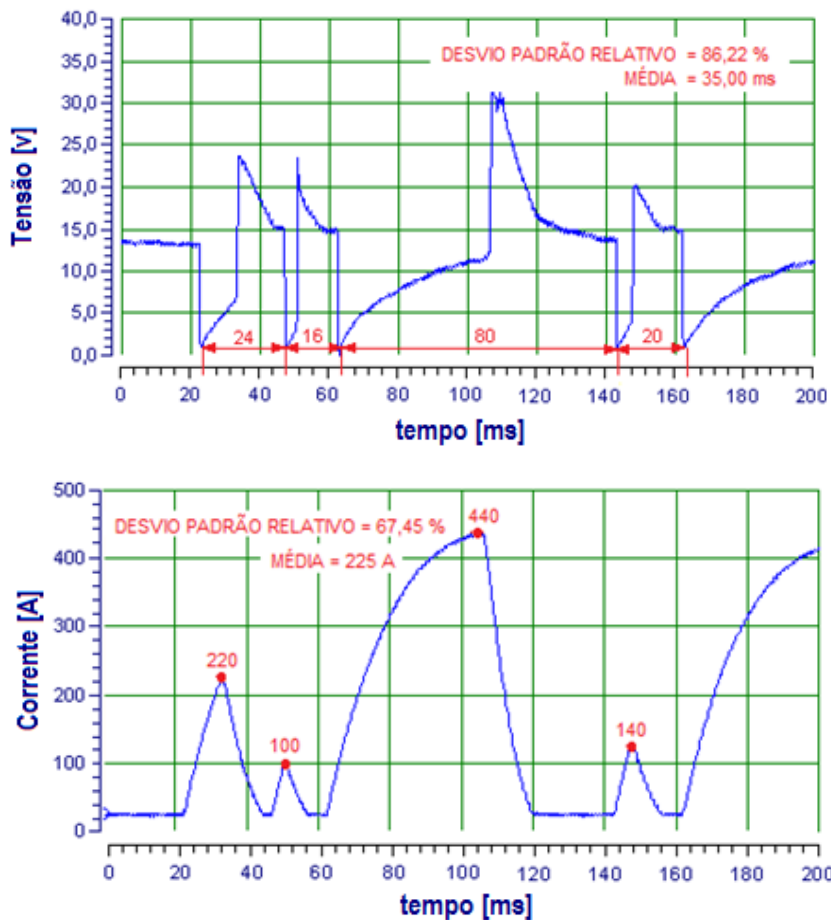


Figura 5. 11 - Oscilogramas da solda realizada com $V_s = 30$ cm/min, $V_a = 3,2$ m/min, $U_{aj} = 12$ V e DBCP = 12 mm.

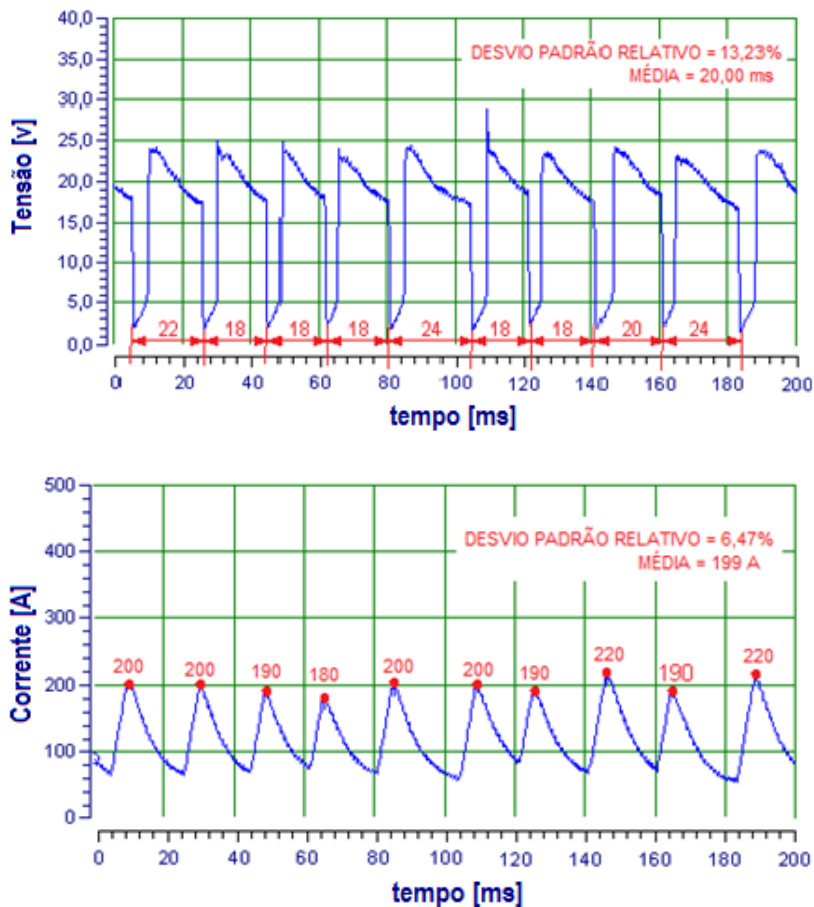


Figura 5. 12 - Oscilogramas da solda realizada com $V_s = 30$ m/min, $V_a = 3,2$ m/min, $U_{aj} = 17$ V e DBCP = 12 mm.

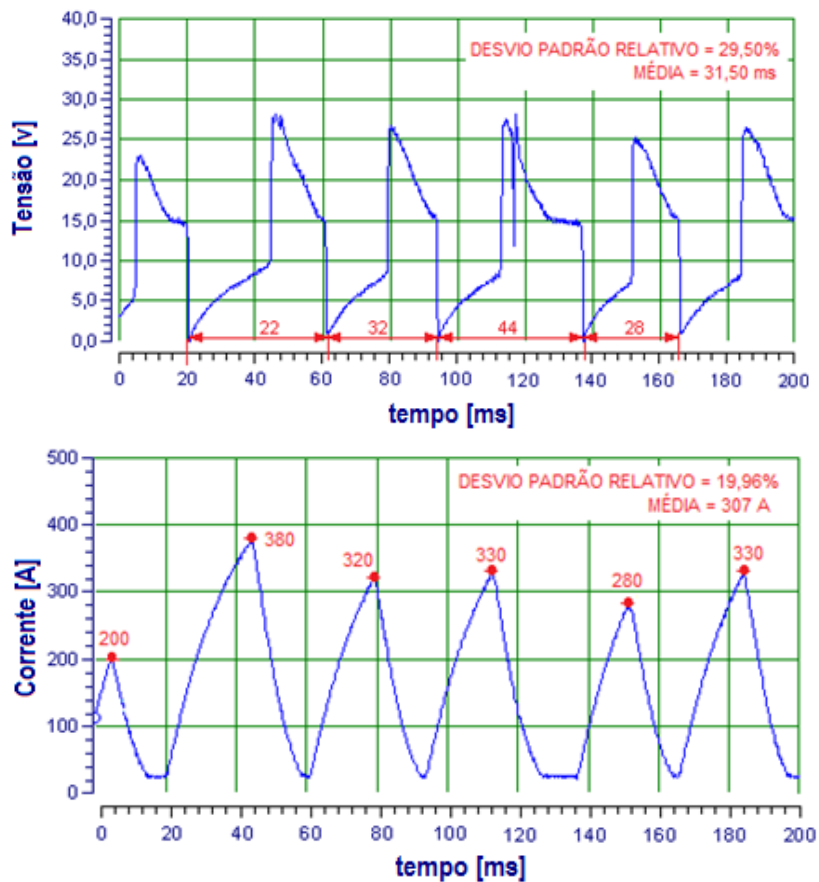


Figura 5. 13 - Oscilogramas da solda realizada com $V_s = 30$ cm/min, $V_a = 3,2$ m/min, $U_{aj} = 19$ V, DBCP = 12 mm.

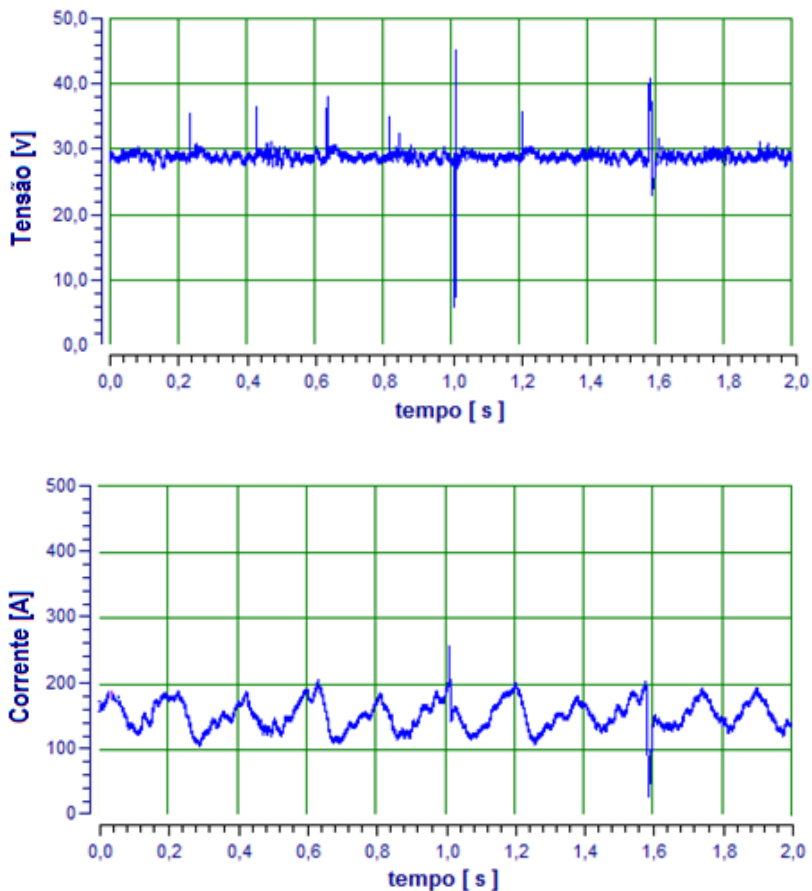


Figura 5. 14 - Oscilogramas da solda realizada com $V_s = 30$ cm/min , $V_a = 3,2$ m/min, $U_{aj} = 27$ V, e DBCP = 12 mm.

Assim, pelos resultados apresentados, há que salientar que o valor de tensão ajustada (U_{aj}) que resultou em maior frequência de transferência metálica e, portanto maior estabilidade aumentou com a velocidade do arame: para $V_a = 2,4$ m/min a melhor condição foi $U_{aj} = 16$ V, para $V_a = 3,2$ m/min a melhor condição foi $U_{aj} = 17$ V e para $V_a = 4,3$ m/min $U_{aj} = 18$ V.

Os resultados destes ensaios mostraram ainda que o valor de U_{aj} que resulta em maior frequência de transferência metálica e, portanto em maior estabilidade independe da velocidade de soldagem.

Da mesma maneira ao analisar os oscilogramas das soldas realizadas com velocidade de arame 2,4 m/min observou-se que as soldas realizadas com tensões ajustadas com valores maiores que 19 V apresentaram transferência pelo modo misto globular/curto-circuito como mostram, por exemplo, os oscilogramas apresentados na Figura 5. 15 referentes à solda realizada com velocidade de arame 2,4 m/min, tensão ajustada em 22 V e velocidade de soldagem 30 cm/min. Ao analisar os oscilogramas das soldas realizadas com velocidade de arame 4,3 m/min observou-se que o modo de transferência misto globular/curto-circuito ocorreu para soldas realizadas com tensões ajustadas com valores maiores que 26 V como mostram, por exemplo, os oscilogramas apresentados na Figura 5. 16 referentes à solda realizada com velocidade de arame 4,3 m/min, tensão ajustada em 29 V e velocidade de soldagem 30 cm/min.

Ainda, ao analisar os oscilogramas dos ensaios realizados com velocidade de arame 3,2 m/min e velocidade de soldagem 30 cm/min observa-se que para a tensão ajustada em 17 V (tensão que determina maior frequência de transferências metálicas, vide gráfico da Figura 5. 9) os desvios padrão relativos do período de transferência metálica e dos picos de corrente com valores de respectivamente 13,23% e 6,47% (vide os oscilogramas da Figura 5. 12) são menores do que os da solda realizada com 12 V com valores de respectivamente 86,22% e 67,45% (vide os oscilogramas apresentados na Figura 5. 11) e que os da solda realizada com 19 V com valores de respectivamente 29,50% e 19,96%

(vide oscilogramas apresentados na Figura 5. 13) indicando que para uma determinada velocidade de arame e indutância a maior frequência de transferência metálica determina a maior estabilidade do arco e ou regularidade da transferência metálica, estando de acordo com o critério de estabilidade da transferência citado na revisão bibliográfica no item 2.3.4.1, que considera que maior frequência de transferência indica maior estabilidade do arco e ou regularidade da transferência metálica.

Ao utilizar este critério de estabilidade da transferência citado na revisão bibliográfica no item 2.3.4.1, que considera que maior frequência de transferência indica maior estabilidade do arco e ou regularidade da transferência metálica, observou-se que para os ensaios realizados com velocidade de arame 2,4 m/min, com variação da tensão e as velocidades de soldagem de 15, 25 e 30 cm/min, as soldas que apresentaram maiores frequências de transferência metálica e, portanto maior estabilidade do arco e ou regularidade da transferência metálica foram as soldas realizadas com tensão ajustada em 16 V (vide gráfico da Figura 5. 8).

Da mesma maneira para as soldas realizadas com velocidade de arame de 3,2 m/min, com variação da tensão e as velocidades de soldagem de 15, 25 e 30 cm/min, as soldas que apresentaram maiores frequências de transferência metálica e, portanto maior estabilidade do arco e ou regularidade da transferência metálica foram as soldas realizadas com a tensão ajusta em 17 V (vide gráfico da Figura 5. 9).

Para as soldas realizadas com velocidade de arame de 4,3 m/min, com variação da tensão e as velocidades de soldagem de 15, 25 e 30 cm/min, as soldas que apresentaram maiores frequências de

transferência metálica e, portanto maior estabilidade do arco e ou regularidade da transferência metálica foram as soldas realizadas com tensão ajustada em 18 V (vide gráfico da Figura 5.10).

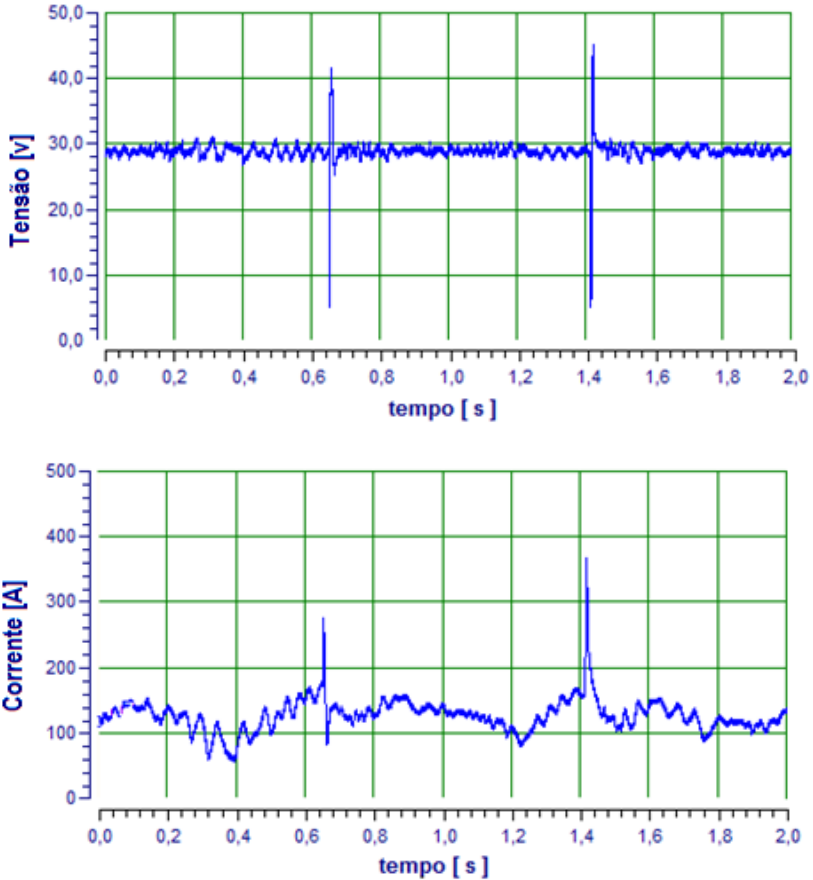


Figura 5. 15 - Oscilogramas da solda realizada com $V_s = 25$ cm/min, $V_a = 2,4$ m/min, $U_{aj} = 22$ V e DBCP = 12 mm.

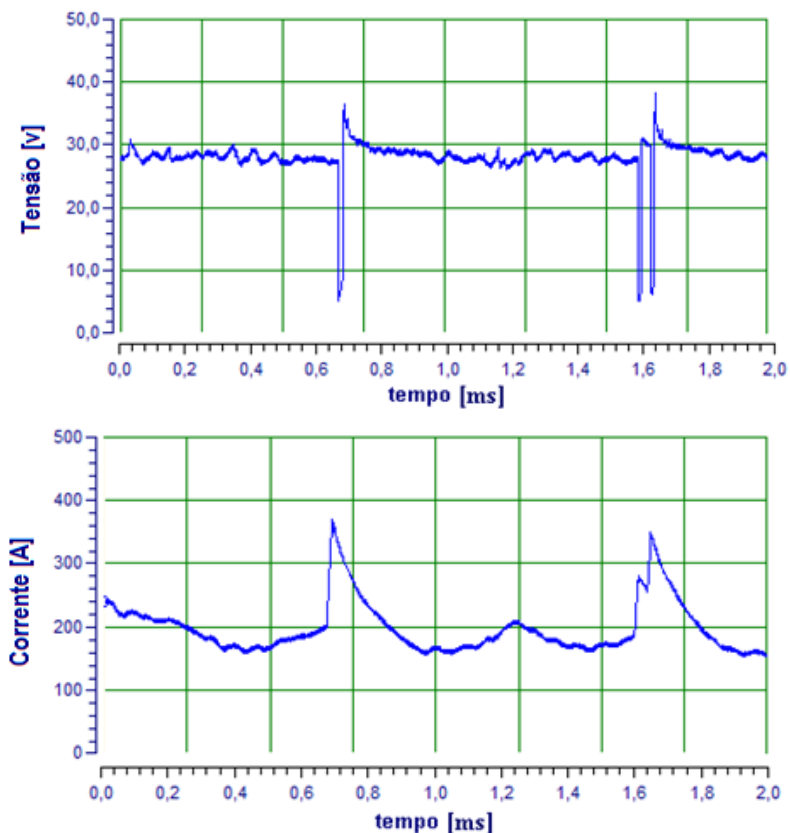


Figura 5. 16 - Oscilogramas da solda realizada com $V_s = 30$ cm/min, $V_a = 4,3$ m/min, $U_{aj} = 29$ V, e DBCP = 12 mm.

Para verificar o comportamento da corrente em função da variação da tensão foram plotados os valores de corrente versus tensão resultante dos ensaios de isoconsumo (mostrados nas tabelas do apêndice C). Estas curvas de isoconsumo são apresentadas na Figura 5.17, Figura 5.18 e Figura 5.19.

No gráfico da Figura 5.17 que apresenta os valores de tensão versus corrente para as soldas realizadas com velocidade de arame de 2,4 m/min se pode observar que para as três velocidades de soldagem utilizadas (15, 25 e 30 cm/min) os menores valores de corrente média (respectivamente 100,3 A, 98,1 A e 96,5 A) correspondem às soldas realizadas com tensão ajustada 16 V, valor de tensão que também resultou em maior frequência de transferência metálica e, portanto em maior estabilidade de transferência metálica para as soldas realizadas com esta velocidade de arame.

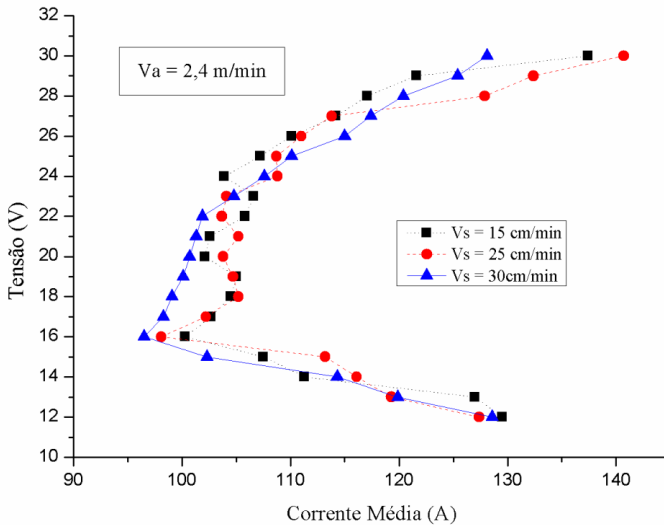


Figura 5. 17 – Curvas de isoconsumo para o processo MIG/MAG com transferência por curto-circuito e $V_a = 2,4$ m/min.

O crescimento da corrente média de soldagem para valores de tensão maiores que 16 V é devido ao aumento da tensão, que aumenta o comprimento do arco e provoca uma redução no comprimento energizado do eletrodo o que diminui a resistência elétrica e por consequência aumenta a corrente de soldagem tendendo manter a

mesma taxa de fusão do eletrodo. Para valores de tensão menores que 16 V o crescimento da corrente ocorre provavelmente devido à formação de gotas grosseiras que determinam um maior tempo de curto circuito com aumento da corrente e do tempo de curto circuito e por consequência o aumento da corrente média de soldagem.

Da mesma maneira como ocorreu para as soldas realizadas com velocidade de arame de 2,4 m/min, para as soldas realizadas com velocidades de arame de 3,2 e 4,3 m/min (vide, Figura 5. 18 e a Figura 5. 19) os menores valores de corrente média ocorreram para valores de tensão que também resultaram em maior frequência de transferência metálica e, portanto em maior estabilidade de transferência metálica, ou seja, os menores valores de corrente média ocorreram para os valores de tensão ajustados em 17 e 18 V respectivamente.

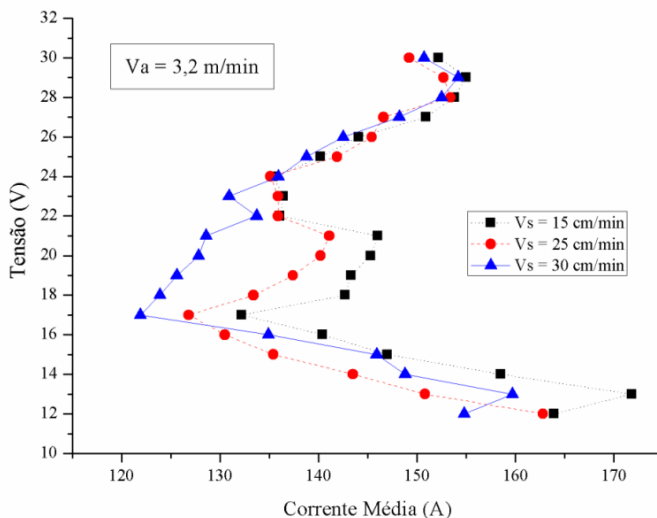


Figura 5. 18- Curvas de isoconsumo para o processo MIG/MAG com transferência por curto-circuito e $V_a = 3,2 \text{ m/min}$.

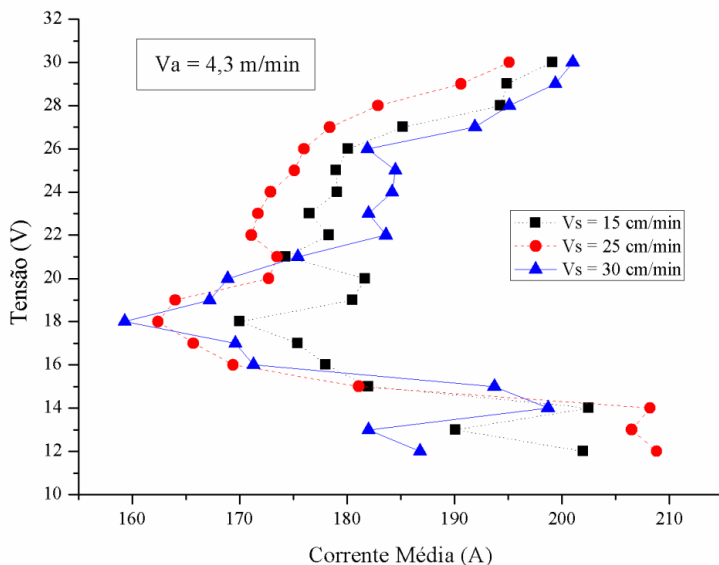


Figura 5. 19 - Curvas de isoconsumo para o processo MIG/MAG com transferência por curto-circuito e $V_a = 4,3 \text{ m/min}$.

5.1.2- Parâmetros de Transferência Estável pelo modo Goticular

Conforme já comentado no procedimento experimental os ensaios para determinar os parâmetros para ocorrência de transferência estável pelo modo goticular envolveram as seguintes etapas:

- a) Determinação das correntes de soldagem;
- b) Determinação das tensões.

a) Determinação das correntes de soldagem

Como na transferência pelo modo goticular a fonte é operada com tensão constante foi necessário realizar soldas com variação da velocidade do arame até conseguir as correntes desejadas (280, 320 e 340 A). Assim, inicialmente realizaram-se soldas com valor da tensão ajustado em 30 V (valor arbitrado tendo como referencia o Mapa de

transferência metálica da Figura 3. 13) e aumentou-se a velocidade do arame a fim de determinar as velocidades do arame necessárias para obter as correntes desejadas. A leitura dos sinais de corrente e tensão indicou as correntes e tensões médias apresentadas na Tabela 5. 8.

Tabela 5. 8 - Velocidade de arame versus corrente e tensão médias.

Va (m/min)	Im (A)	Um (V)
7,5	245,8	29,7
8,0	252,6	29,9
8,5	265,9	29,8
9,0	282,3	28,9
9,5	297,2	28,7
10,0	314,6	27,8
10,5	328,2	26,8

Va = velocidade do arame, Im = corrente média, Um = tensão média.

Porém, ao examinar visualmente os oscilogramas de corrente e tensão destas soldas observou-se que não ocorreram transferências pelo modo goticular, como se pode observar, por exemplo, nos oscilogramas apresentados na Figura 5. 20 e na Figura 5. 21, referentes às soldas realizadas com velocidades de arame de 7,5 e 10,5 m/min nos quais se observa a presença de curtos-circuitos.

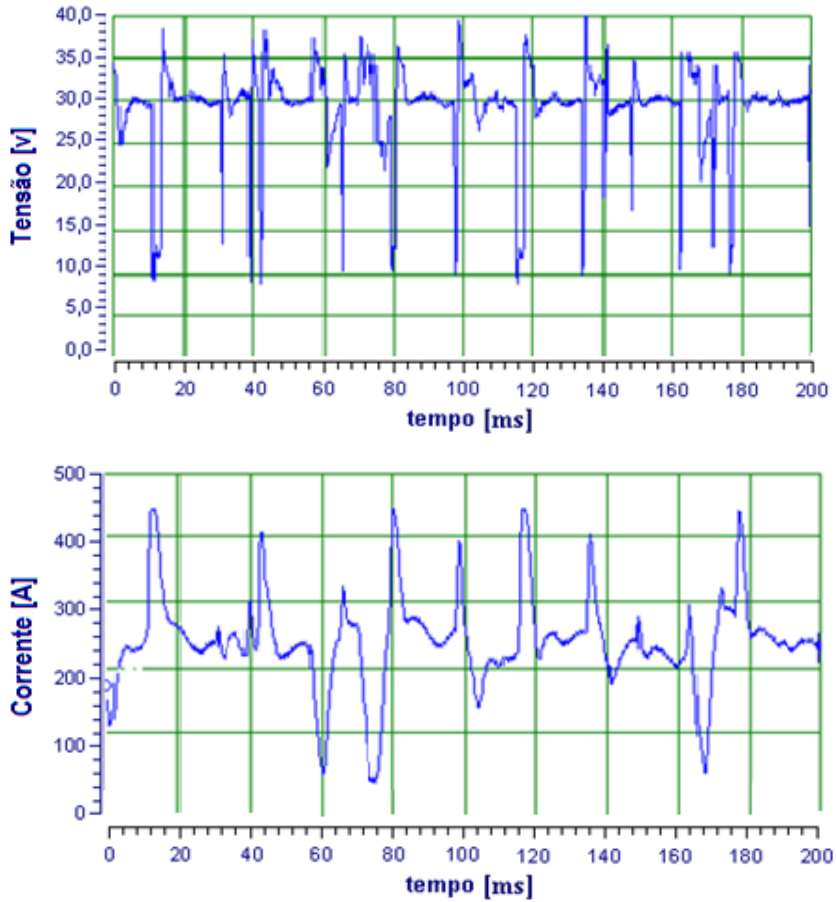


Figura 5. 20 - Oscilogramas da solda realizada com $V_a = 7,5$ m/min e $U_{aj} = 30$ V.

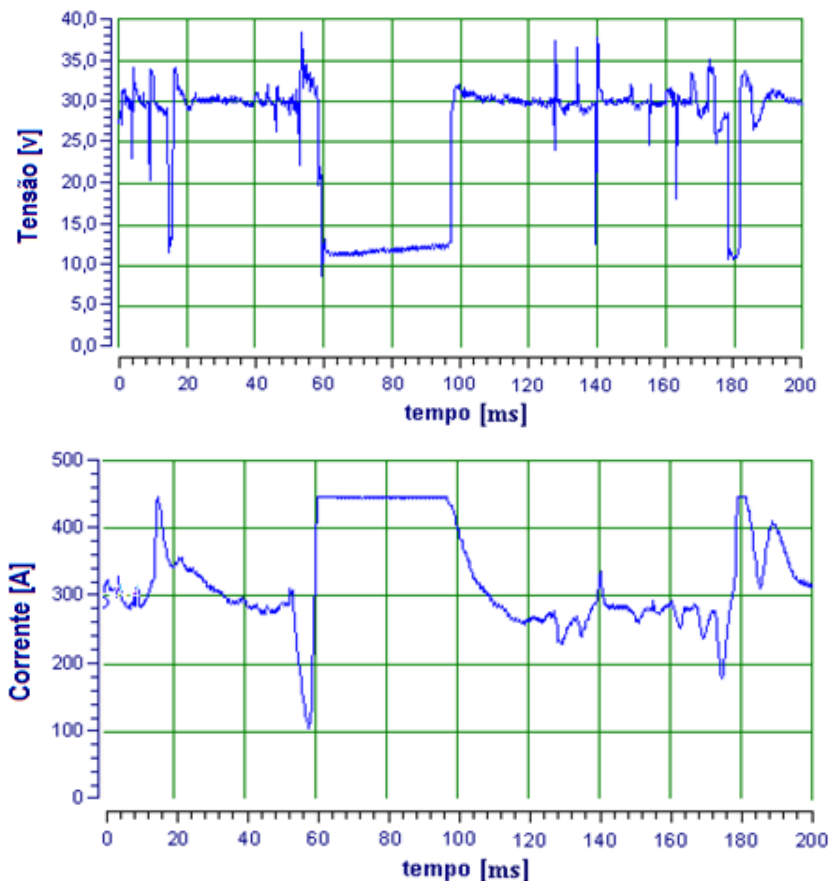


Figura 5. 21 - Oscilogramas da solda realizada com $V_a = 10,5$ m/min e $U_{aj} = 30$ V.

Assim, foi necessário realizar ensaios de isoconsumo para determinar para quais valores de tensões ocorrem transferência metálica pelo modo goticular para os níveis de corrente de soldagem de 280, 320 e 340 A.

b) Determinação das Tensões

Para determinar as tensões com transferência goticular para os níveis de corrente 280, 320 e 340 A, foram realizados ensaios de isoconsumo nos quais se utilizou as velocidades de arame de 8,5; 9,5 e 10 m/min respectivamente, e ajustou-se tensões que foram aumentadas em degraus de 1 V até que ocorresse transferência goticular. Os valores das tensões ajustadas e das correntes e tensões médias bem como dos períodos de curto-circuito medidos durante a realização destas soldas são mostrados respectivamente na Tabela 5. 9, na Tabela 5. 10 e na Tabela 5. 11. Os valores das tensões para os quais começaram ocorrer transferências pelo modo goticular foram identificados pelo valor nulo dos tempos de curto circuito, pois por definição para o modo de transferência goticular não devem ocorrer curtos-circuitos. Assim, a transferência pelo modo goticular para o nível de corrente 280A foi obtida com velocidade de arame de 8,5 m/min e tensão ajustada em 33 V (valores destacados em negrito na Tabela 5. 9).

Tabela 5. 9 - Ensaios de isoconsumo com velocidade de arame de 8,5 m/min.

Uaj (V)	Im (A)	Um (V)	Tempo de Curto-Circuito (ms)
31	269,7	30,9	0,8
32	274,5	31,9	0,4
33	282,0	32,9	0,0
34	285,7	33,9	0,0
35	288,9	34,9	0,0

Uaj = tensão ajustada, Im = corrente média, Um = tensão média.

Para o nível de corrente 320A a transferência pelo modo gótico foi obtida com velocidade de arame de 9,5 m/min e tensão ajustada em 35 V (valores destacados em negrito na Tabela 5. 10), para o nível de corrente de 340 A com transferência pelo modo gótico foi obtida com velocidade de arame de 10 m/min e tensão ajustada em 36 V (valores destacados em negrito na Tabela 5. 11).

Tabela 5. 10 - Ensaio de isoconsumo com velocidade de arame de 9,5 m/min.

Uaj (V)	Im (A)	Um (V)	Tempo de Curto-Circuito (ms)
32	276,1	30,1	1,7
33	292,7	32,6	0,7
34	313,2	33,9	0,6
35	319,7	34,9	0,0
36	325,7	35,9	0,0
37	331,8	36,9	0,0

Uaj = tensão ajustada, Im = corrente média, Um = tensão média.

Tabela 5. 11 - Ensaio de isoconsumo com velocidade de arame de 10 m/min.

Uaj (V)	Im (A)	Um (V)	Tempo de Curto-Circuito (ms)
35	313,9	35,1	1,8
36	338,8	35,9	0,0
37	346,1	36,9	0,0

Uaj = tensão ajustada, Im = corrente média, Um = tensão média.

A ocorrência de transferência metálica pelo modo gótico para estas tensões foi confirmada pela análise visual dos oscilogramas de tensão e corrente, como mostram, por exemplo, os oscilogramas de tensão e corrente apresentados na Figura 5. 22, referentes a solda

realizada com $V_a = 8,5$ m/min e tensão justada 33 V, nos quais se constata a ocorrência de transferência pelo modo goticular.

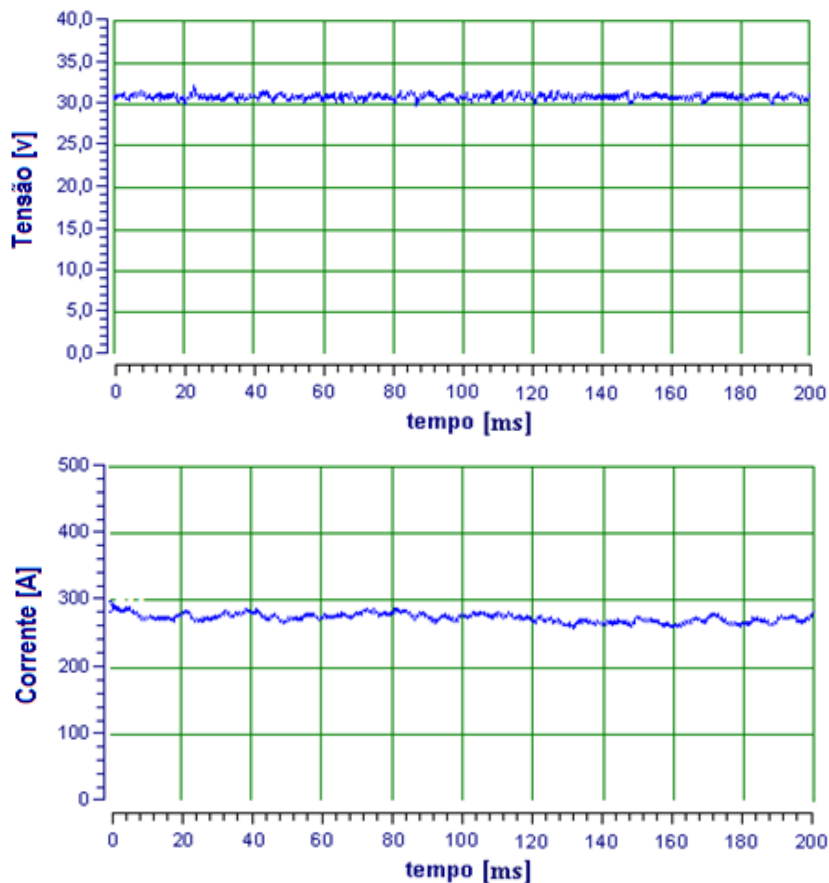


Figura 5. 22 - Ensaio realizado com $V_a = 8,5$ m/min e tensão justada 33 V.

Para verificar o comportamento da corrente em função da variação da tensão foram plotados os valores de tensão versus corrente para cada variação da tensão com velocidade de alimentação constante. Estas curvas (curvas de isoconsumo) são apresentadas na Figura 5. 23, e nelas pode-se observar um crescimento da corrente com o aumento da

tensão. Isto ocorre devido ao aumento do comprimento do arco que é proporcional ao aumento da tensão o que provoca uma redução no comprimento energizado do eletrodo que diminui a resistência elétrica e por consequência aumenta a corrente de soldagem tendendo manter a mesma taxa de fusão do eletrodo.

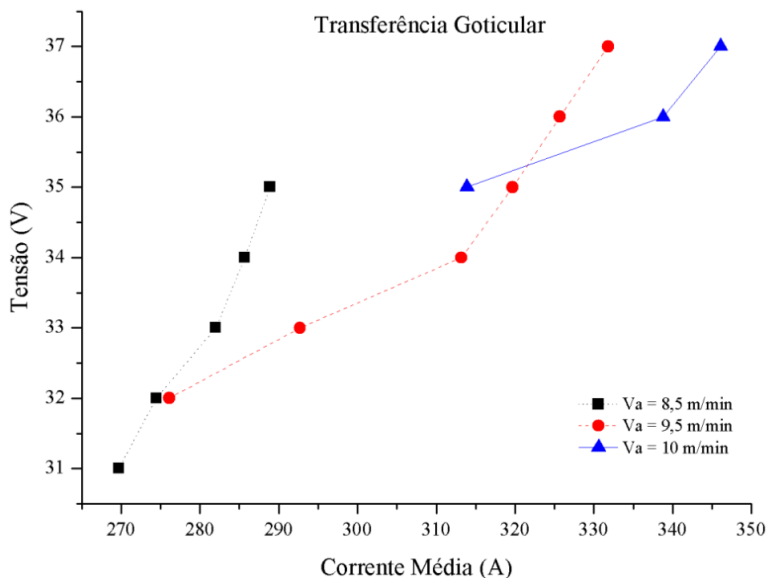


Figura 5. 23 – Curvas de isoconsumo para o processo MIG/MAG e transferência goticular.

A Figura 5. 24 apresenta o gráfico de tensão versus corrente dos experimentos realizados com velocidade de soldagem de 30 cm/min, modos de transferência por curto-circuito (com DBCP 12 mm) e goticular (com DBCP 16 mm). Nesta figura, pode-se perceber que as soldas realizadas pelo modo curto-circuito, apresentaram pouca variação da corrente de soldagem diante da variação da tensão de soldagem

quando comparadas a variação da corrente das soldas realizadas pelo modo goticular.

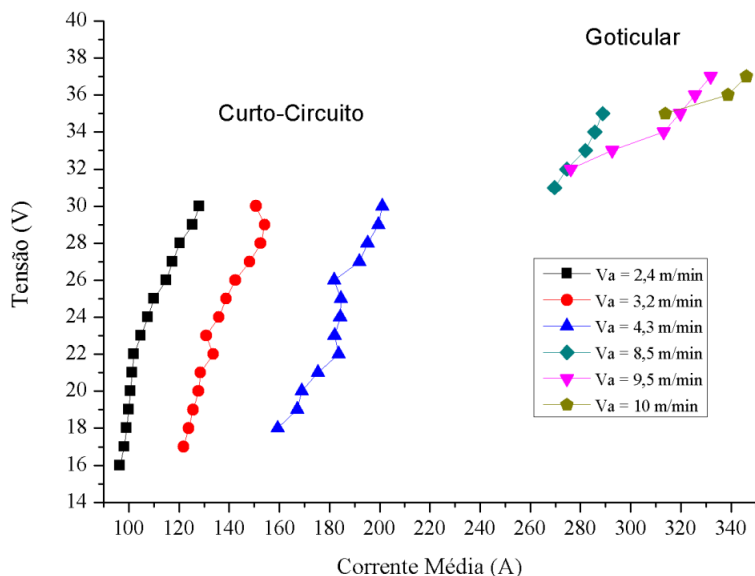


Figura 5. 24 – Curvas de isoconsumo para o processo MIG/MAG e transferência pelos modos curto-circuito e goticular.

A diferença na resposta da variação da corrente diante da variação da tensão explica-se pelo comprimento energizado do eletrodo, pois ao se considerar que as faixas de tensão estão na região de estabilidade operacional a variações dos comprimentos de arco com a variação da tensão são similares e como as diferenças dos níveis de corrente entre os dois modos de transferência são na ordem de 60, a mesma variação do comprimento energizado do eletrodo (devido à mudança no comprimento do arco com a tensão) determina para o modo goticular uma variação mais significativa da corrente no sentido de manter a taxa de fusão do eletrodo constante.

5.1.3- Parâmetros de Transferência por Corrente Pulsada.

Os cálculos dos valores das variáveis para soldar utilizando corrente pulsada e arame maciço são mostrados no apêndice A e os resultados são apresentados na Tabela 5. 12. Da mesma forma os valores das variáveis para soldar utilizando corrente pulsada com arame tubular são apresentados na Tabela 5. 13 e os cálculos no apêndice B.

Tabela 5. 12 - Valores das variáveis para soldar utilizando corrente pulsada e processo MIG/MAG.

Va (m/min)	Im (A)	T (ms)	Ip (A)	tp (ms)	Ib (A)	tb (ms)
3	100	28	280	6,5	46	21,5
			350	4,0	57	24,0
4	140	21	280	6,5	77	14,5
			350	4,0	88	17,0
5	180	17	280	6,5	118	10,5
			350	4,0	112	13,0

Va = velocidade do arame, T = período de transferência, Im = corrente média, Ip = corrente de pulso, tp = tempo de pico, Ib = corrente de base, tb = tempo de base.

Tabela 5. 13 - Valores das variáveis para soldar utilizando corrente pulsada e processo Arame Tubular.

Va (m/min)	Im (A)	T (ms)	Ip (A)	tp (ms)	Ib (A)	tb (ms)
3,5	100	24	280	6,5	33	17,5
			350	4,0	50	20,0
5	140	17	280	6,5	53	10,5
			350	4,0	75	13,0
6,5	180	13	280	6,5	80	6,5
			350	4,0	104	9,0

Va = velocidade do arame, T = período de transferência, Im = corrente média, Ip = corrente de pulso, tp = tempo de pico, Ib = corrente de base, tb = tempo de base.

5.2- VARIABILIDADE EM SOLDAS AUTOMÁTICAS

Com o objetivo de determinar como diferentes condições de soldagem afetam a variabilidade da geometria e diluição dos cordões das soldas realizadas de forma automática, foram realizados três conjuntos de ensaios (soldas) ensaios tanto com o processo MIG/MAG quanto com o processo Arame Tubular. No primeiro conjunto de ensaios, para investigar como diferentes níveis de corrente de soldagem afetam a variabilidade das soldas realizadas com tensão constante utilizou-se diferentes valores de velocidade do arame (por consequência de corrente média) e, com a mesma finalidade nas soldas realizadas com corrente pulsada utilizou-se diferentes valores de corrente média (I_m).

No segundo e no terceiro conjuntos de ensaios utilizou-se diferentes valores para a distância bico de contato peça (DBCP) e para a velocidade de soldagem (V_s), com o objetivo de investigar como a variação nestes fatores afeta a variabilidade dos cordões de solda realizados com os dois tipos de arame e os três diferentes modos de transferência metálica investigados neste estudo. Todos estes ensaios (soldas) foram realizados utilizando a técnica de simples deposição sobre chapa e as demais condições de soldagem indicadas Tabela 4. 1. Os valores dos fatores (variáveis) velocidade de soldagem, distância bico de contato peça, tensão, velocidade do arame foram definidos tendo como base os resultados dos ensaios e cálculos utilizados para determinar os parâmetros de transferência estável pelo modo curto-circuito, goticular e pulsado.

Assim, nas soldas realizadas com o processo MIG/MAG e diferentes valores de velocidade do arame, os valores das tensões a serem ajustadas na fonte de soldagem (U_{aj}) para o modo de

transferência por curto circuito foram definidos pela tensão que determina a maior frequência, pois como já comentado no item 5.1 (Parâmetros de transferência estável por curto-circuito), para uma determinada velocidade de arame e indutância a maior frequência de transferência metálica determina a maior estabilidade do arco e ou regularidade da transferência metálica. Para a velocidade de arame de 2,4 m/min o valor adotado para a tensão a ser ajustada na fonte foi 16 V. Para a velocidade de arame de 3,2 m/min o valor adotado para a tensão a ser ajustada na fonte foi 17 V e para a velocidade de 4,3 m/min o valor adotado foi 18 V (Tabela 5. 14). Da mesma maneira, para a transferência pelo modo goticular foram adotados como valores das tensões a serem ajustados na fonte os mesmos definidos no item 5.2 (Parâmetros de transferência estável pelo modo goticular), Tabela 5. 14. Para as soldas realizadas com correntes pulsadas e diferentes corrente médias (vide Tabela 5. 15) foram utilizados os mesmos valores apresentados na Tabela 5. 12, calculados de acordo com a metodologia apresentada no item 4.3.1.3 (Procedimentos para determinar os parâmetros para ocorrência de transferência estável pelo modo pulsado). O valor da velocidade de soldagem para estes ensaios foi fixado em 30 cm/min (para permitir um tempo de aquisição de sinais elétricos de soldagem de pelo menos 20 segundos, uma vez que os corpos de prova tinham comprimento de 120 mm). Finalmente, para a distância bico de contato peça (DBCP) foram adotados os mesmos os valores utilizados nos ensaios realizados para determinar os parâmetros de transferência estável pelos modos curto-circuito, goticular e pulsado, ou seja, adotou-

se 12 mm para o modo curto-circuito e 16 mm para os modos goticular e pulsado (vide Tabela 5. 14 e Tabela 5. 15).

Tabela 5. 14 - Valores das variáveis das soldas realizadas de modo automático com o processo MIG/MAG e diferentes velocidades de arame (V_a).

Solda n°	Transferência Metálica	V_a (m/min)	I_m (A)	U_{aj} (V)	V_s (cm/min)	DBCP (mm)
1	Curto-circuito	2,4	100	16	30	12
2		3,2	140	17	30	12
3		4,3	180	18	30	12
4	Goticular	8,5	280	33	30	16
5		9,5	320	35	30	16
6		10,0	340	36	30	16

Tabela 5. 15 - Valores das variáveis das soldas realizadas de modo automático com o processo MIG/MAG e diferentes correntes médias (I_m).

Solda n°	Transferência Metálica	V_a (m/min)	I_m (A)	I_p^* (A)	V_s (cm/min)	DBCP (mm)
7	Pulsado 1	3,0	100	280	30	16
8		4,0	140	280	30	16
9		5,0	180	280	30	16
10	Pulsado 2	3,0	100	350	30	16
11		4,0	140	350	30	16
12		5,0	180	350	30	16

*As duas ondas pulsadas se diferenciam, principalmente, pela corrente de pulso.

Nas soldas realizadas com o processo MIG/MAG e diferentes valores da distância bico de contato para os modos de transferência por curto-circuito e goticular, para a variável velocidade de arame e para a variável tensão ajustada na fonte foram adotados os valores centrais utilizados para as soldas realizadas com diferentes correntes médias, ou seja, $V_a = 3,2$ A com $U_{aj} = 17$ V para o curto-circuito e $V_a = 9,5$ A com $U_{aj} = 35$ V para o goticular. Para o modo pulsado foram utilizados os valores centrais das variáveis do pulsado1 ($V_a = 4$ m/min, $I_m = 140$ A e

$I_p = 280$ A). Da mesma maneira para a velocidade de soldagem também foi adotado o mesmo valor utilizado para as soldas realizadas com diferentes correntes médias ($V_s = 30$ cm/min). Os valores da DBCP foram definidos por dois extremos e um intermediário. Para valores intermediários foram adotados os mesmos utilizados nas soldas realizadas com diferentes correntes médias, ou seja, 12 mm para a transferência por curto-circuito e 16 mm para a transferência pelos modos goticular e pulsado. Os valores extremos foram definidos pelo acréscimo e o decréscimo de 2 mm em relação a cada valor intermediário (vide Tabela 5. 16 e Tabela 5. 17).

Tabela 5. 16 - Valores das variáveis das soldas realizadas de modo automático com o processo MIG/MAG, corrente constante com diferentes DBCPs.

Solda n°	Transferência Metálica	Va (m/min)	Im (A)	Uaj (V)	Vs (cm/min)	DBCP (mm)
13	Curto-circuito	3,2	150	17	30	10
14		3,2	140	17	30	12
15		3,2	135	17	30	14
16	Goticular	9,5	335	35	30	14
17		9,5	320	35	30	16
18		9,5	305	35	30	18

Tabela 5. 17 - Valores das variáveis das soldas realizadas de modo automático com o processo MIG/MAG, corrente pulsada com diferentes DBCPs.

Solda n°	Transferência Metálica	Va (m/min)	Im (A)	I_p (A)	Vs (cm/min)	DBCP (mm)
19	Pulsado 1	4,0	140	280	30	14
20		4,0	140	280	30	16
21		4,0	140	280	30	18

Nas soldas realizadas com o processo MIG/MAG e diferentes velocidades de soldagem, os valores da velocidade de soldagem foram

definidos por dois extremos e um intermediário e o valor da velocidade de soldagem adotado como intermediário foi o mesmo utilizado nas soldas automáticas realizadas com o processo MIG/MAG e diferentes correntes médias ($V_s = 30$ m/min), os valores extremos foram definidos pelo acréscimo e o decréscimo de 5 m/min em relação a este valor. Para a velocidade de arame, a tensão ajustada na fonte e a DBCP foram adotados os valores centrais utilizados nas soldas realizadas com diferentes correntes médias. (vide valores na Tabela 5. 18 e Tabela 5. 19).

Tabela 5. 18 - Valores das variáveis das soldas realizadas de modo automático com o processo MIG/MAG, corrente constante e diferentes velocidades de soldagem (V_s).

Solda n°	Transferência Metálica	V_a (m/min)	I_m (A)	U_{aj} (V)	V_s (cm/min)	DBCP (mm)
22	Curto-circuito	3,2	140	17	25	12
23		3,2	140	17	30	12
24		3,2	140	17	35	12
25	Goticular	9,5	320	35	25	16
26		9,5	320	35	30	16
27		9,5	320	35	35	16

Tabela 5. 19 - Valores das variáveis das soldas realizadas de modo automático com o processo MIG/MAG, corrente pulsada e diferentes velocidades de soldagem (V_s).

Solda n°	Transferência Metálica	V_a (m/min)	I_m (A)	I_p (A)	V_s (cm/min)	DBCP (mm)
28	Pulsado 1	4,0	140	280	25	16
29		4,0	140	280	30	16
30		4,0	140	280	35	16

Para o conjunto de ensaios realizados com arame tubular e diferentes velocidades de arame as variáveis de entrada foram ajustadas com os mesmos valores adotados para as soldas realizadas com o processo MIG/MAG, com exceção do valor utilizado para a tensão a ser ajustada na fonte de soldagem no modo de transferência por curto-circuito (19 V), que foi definido com base em ensaios exploratórios (vide valores na Tabela 5. 20 e Tabela 5. 21).

Na transferência pelo modo pulsado foram utilizados os valores apresentados na Tabela 5. 13, calculados de acordo com a metodologia apresentada no item 4.3.1.3 (Procedimentos para determinar os parâmetros para ocorrência de transferência estável pelo modo pulsado).

Nas soldas realizadas com diferentes distâncias bico de contato peça (DBCP) foram utilizados os mesmos valores da DBCP adotados nas soldas com o processo MIG/MAG. Para as demais variáveis foram adotados os valores centrais utilizados para as soldas realizadas com diferentes correntes médias (vide valores na Tabela 5.22 e Tabela 5.23)

Da mesma forma, para as soldas realizadas com diferentes velocidades de soldagem foram utilizados os mesmos valores de velocidade de soldagem adotados nas soldas com o processo MIG/MAG. Para as demais variáveis também foram adotados os valores centrais utilizados para as soldas realizadas com diferentes correntes médias (vide valores na Tabela 5.24 e na Tabela 5.25).

Tabela 5. 20 - Valores das variáveis das soldas realizadas de modo automático com o processo arame tubular e diferentes velocidades de arame (Va).

Solda n°	Transferência Metálica	Va (m/min)	Im (A)	Uaj (V)	Vs (cm/min)	DBCP (mm)
1T	Curto-circuito	2,4	85	19	30	12
2T		3,2	110	19	30	12
3T		4,3	140	19	30	12
4T	Goticular	8,5	230	33	30	16
5T		9,5	250	35	30	16
6T		10,0	270	36	30	16

Tabela 5. 21 - Valores das variáveis das soldas realizadas de modo automático com o processo arame tubular com diferentes correntes médias (Im).

Solda n°	Transferência Metálica	Va (m/min)	Im (A)	Ip* (A)	Vs (cm/min)	DBCP (mm)
7T	Pulsado 1	3,5	100	280	30	16
8T		5,0	140	280	30	16
9T		6,5	180	280	30	16
10T	Pulsado 2	3,5	100	350	30	16
11T		5,0	140	350	30	16
12T		6,5	180	350	30	16

*As duas ondas pulsadas se diferenciam, principalmente, pela corrente de pulso.

Tabela 5. 22 - Valores das variáveis das soldas realizadas de modo automático com o processo arame tubular, corrente constante com diferentes DBCPs.

Solda n°	Transferência Metálica	Va (m/min)	Im (A)	Uaj (V)	Vs (cm/min)	DBCP (mm)
13T	Curto-circuito	3,2	140	19	30	10
14T	Curto-circuito	3,2	140	19	30	12
15T	Curto-circuito	3,2	140	19	30	14
16T	Goticular	9,5	320	35	30	14
17T	Goticular	9,5	320	35	30	16
18T	Goticular	9,5	320	35	30	18

Tabela 5. 23 - Valores das variáveis das soldas realizadas de modo automático com o processo arame tubular, corrente pulsada com diferentes DBCPs.

Solda n°	Transferência Metálica	Va (m/min)	Im (A)	Ip (A)	Vs (cm/min)	DBCP (mm)
19T	Pulsado 1	5,0	140	280	30	14
20T	Pulsado 1	5,0	140	280	30	16
21T	Pulsado 1	5,0	140	280	30	18

Tabela 5. 24 - Valores das variáveis das soldas realizadas de modo automático com o processo arame tubular, tensão constante com diferentes velocidades de soldagem (Vs).

Solda n°	Transferência Metálica	Va (m/min)	Im (A)	Uaj (V)	Vs (cm/min)	DBCP (mm)
22T		3,2	110	19	25	12
23T	Curto-circuito	3,2	110	19	30	12
24T		3,2	110	19	35	12
25T		9,5	250	35	25	16
26T	Goticular	9,5	250	35	30	16
27T		9,5	250	35	35	16

Tabela 5. 25 - Valores das variáveis das soldas realizadas de modo automático com o processo arame tubular, corrente pulsada com diferentes velocidades de soldagem (Vs).

Solda n°	Transferência Metálica	Va (m/min)	Im (A)	Ip (A)	Vs (cm/min)	DBCP (mm)
28T		5,0	140	280	25	16
29T	Pulsado 1	5,0	140	280	30	16
30T		5,0	140	280	35	16

5.3- RESPOSTAS DAS SOLDAS AUTOMÁTICAS

Como já comentado no procedimento experimental, item 4.3.2 (Determinação da variabilidade das soldas realizadas de modo Automático) com a finalidade de estimar a variabilidade das características geométricas das soldas automáticas, foram definidas como respostas a serem analisadas a penetração (P), a convexidade (C) e a diluição (D).

Para obter estas respostas foram retiradas cinco amostras de cada cordão. Após nestas amostras foram realizados ensaios macrográficos e nas macrografias foram medidas a largura, o reforço, a penetração, a área de reforço e a área de penetração. Assim, por exemplo, na Tabela 5. 26 são mostradas as respostas das soldas realizadas com o processo MIG/MAG, transferência por curto-circuito e variação da velocidade do arame (utilizando os valores apresentados na Tabela 5. 14).

Com estas respostas e as formulas apresentadas no item 4.3.1 do procedimento experimental foram calculadas a diluição e a convexidade para cada uma das cinco amostras de cada um destes três cordões (vide valores apresentados na Tabela 5.27).

Tabela 5. 26 - Respostas das soldas realizadas de modo automático, processo MIG/MAG, transferência por curto-circuito e diferentes velocidades do arame (Va).

Solda - Seção	Área Reforço (mm²)	Área Penetração (mm²)	Altura Reforço (mm)	Penetração (mm)	Largura (mm)
1-1	8,80	1,97	2,73	1,43	5,51
1-2	7,43	2,26	2,40	0,92	3,95
1-3	8,05	2,87	2,35	1,01	4,88
1-4	9,78	2,98	2,52	1,05	5,42
1-5	9,32	3,24	2,52	1,18	5,30
2-1	12,13	5,55	2,65	1,68	6,35
2-2	13,64	6,65	2,65	1,60	6,90
2-3	11,60	5,53	2,52	1,68	6,98
2-4	12,87	5,52	2,69	1,81	7,06
2-5	12,84	6,16	2,65	1,68	7,06
3-1	23,10	4,98	3,95	1,56	8,41
3-2	16,70	8,04	3,32	2,02	7,73
3-3	17,34	8,74	3,36	2,23	7,90
3-4	17,48	8,40	3,19	2,19	8,11
3-5	16,57	8,64	3,62	2,14	8,28

*Solda 1 (Im = 100 A), Solda 2 (Im = 140 A) e Solda 3 (Im = 180 A).

Tabela 5. 27 - Variabilidade das soldas realizadas de modo automático com transferência por curto-circuito e diferentes velocidades do arame (Va).

Solda n°	Seções	Transferência por Curto-Circuito		
		Penetração	Convexidade	Diluição
1	1	1,43	0,50	0,18
	2	0,92	0,61	0,23
	3	1,01	0,48	0,26
	4	1,05	0,46	0,23
	5	1,18	0,48	0,26
Média		1,12	0,51	0,23
Desvio Padrão		0,20	0,06	0,03
Desvio Padrão Relativo (%)		17,70	11,56	13,53
2	1	1,68	0,42	0,31
	2	1,60	0,38	0,33
	3	1,68	0,36	0,32
	4	1,81	0,38	0,30
	5	1,68	0,38	0,32
Média		1,69	0,38	0,32
Desvio Padrão		0,08	0,02	0,01
Desvio Padrão Relativo (%)		4,47	5,41	3,49
3	1	1,56	5,39	0,18
	2	2,02	3,83	0,32
	3	2,23	3,54	0,34
	4	2,19	3,70	0,32
	5	2,14	3,87	0,34
Média		2,03	4,07	0,30
Desvio Padrão		0,27	0,75	0,07
Desvio Padrão Relativo (%)		13,47	18,47	23,10

Após foram calculadas a média o desvio padrão e o desvio padrão relativo (indicativo de variabilidade) dos valores de penetração,

convexidade e diluição obtidos a partir das cinco amostras de cada um destes cordões de solda (vide valores apresentados na Tabela 5.27).

Utilizando esta metodologia foram determinados os valores do desvio padrão relativo (indicativo de variabilidade) da penetração, da convexidade e da diluição de cada um dos cordões de solda realizados de forma automática.

Assim, da Tabela 5. 28 até a Tabela 5. 39 são apresentados os valores do desvio padrão relativo da penetração, da convexidade e da diluição das soldas realizadas de forma automática e condições de soldagem indicadas da Tabela 5.14 até a Tabela 5.25.

Tabela 5. 28 - Variabilidade das soldas realizadas de modo automático com o processo MIG/MAG e diferentes velocidades de arame (V_a).

n°	Processo MIG/MAG			Desvio Padrão Relativo (%)		
	Transferência	V_a (m/min)	U_{aj} (V)	Penetração	Convexidade	Diluição
1	Curto-circuito	2,4	16	17,70	11,56	13,53
2	Curto-circuito	3,2	17	4,47	5,41	3,49
3	Curto-circuito	4,3	18	13,47	18,47	23,10
4	Goticular	8,5	33	21,13	13,30	26,47
5	Goticular	9,5	35	5,24	8,14	8,11
6	Goticular	10,0	36	6,02	11,68	6,20

Tabela 5. 29 - Variabilidade das soldas realizadas de modo automático com o processo MIG/MAG e diferentes correntes médias (I_m).

n°	Processo MIG/MAG			Desvio Padrão Relativo (%)		
	Transferência	I_m (A)	I_p^* (A)	Penetração	Convexidade	Diluição
7	Pulsado 1	100	280	8,51	7,17	9,83
8	Pulsado 1	140	280	6,96	8,39	14,40
9	Pulsado 1	180	280	8,96	2,75	2,68
10	Pulsado 2	100	350	16,79	17,43	12,36
11	Pulsado 2	140	350	3,87	9,01	3,09
12	Pulsado 2	180	350	4,56	4,26	2,92

* As duas ondas pulsadas se diferenciam, principalmente, pela corrente de pulso.

Tabela 5. 30 - Variabilidade das soldas realizadas de modo automático com o processo MIG/MAG, corrente constante e diferentes distâncias bico de contato peça (DBCP).

n°	Processo MIG/MAG		DBCP (mm)	Desvio Padrão Relativo (%)		
	Transferência	V_a (m/min)		Penetração	Convexidade	Diluição
13	Curto-circuito	3,2	10	15,86	10,43	10,02
14	Curto-circuito	3,2	12	4,47	5,41	3,49
15	Curto-circuito	3,2	14	9,41	5,09	12,45
16	Goticular	9,5	14	9,12	28,81	14,07
17	Goticular	9,5	16	5,24	8,14	8,11
18	Goticular	9,5	18	14,63	7,58	15,48

Tabela 5. 31 - Variabilidade das soldas realizadas de modo automático com o processo MIG/MAG, corrente pulsada e diferentes distâncias bico de contato peça (DBCP).

Processo MIG/MAG			DBCP (mm)	Desvio Padrão Relativo (%)		
n°	Transferência	Im (A)		Penetração	Convexidade	Diluição
19	Pulsado 1	140	14	13,3	7,60	22,57
20	Pulsado 1	140	16	6,96	8,39	14,40
21	Pulsado 1	140	18	4,81	5,78	3,83

Tabela 5. 32 - Variabilidade das soldas realizadas de modo automático com o processo MIG/MAG, corrente constante e diferentes velocidades de soldagem (Vs).

Processo MIG/MAG			Vs cm/min	Desvio Padrão Relativo (%)		
n°	Transferência	Va m/min		Penetração	Convexidade	Diluição
22	Curto-circuito	3,2	25	5,49	7,51	7,26
23	Curto-circuito	3,2	30	4,47	5,41	3,49
24	Curto-circuito	3,2	35	22,45	9,54	17,00
25	Goticular	9,5	25	8,60	2,86	7,90
26	Goticular	9,5	30	5,24	8,14	8,11
27	Goticular	9,5	35	22,36	5,43	13,67

Tabela 5. 33 - Variabilidade das soldas realizadas de modo automático com o processo MIG/MAG, corrente pulsada e diferentes velocidades de soldagem (Vs).

Processo MIG/MAG			Vs cm/min	Desvio Padrão Relativo (%)		
n°	Transferência	Im A		Penetração	Convexidade	Diluição
28	Pulsado 1	140	25	7,04	5,04	7,91
29	Pulsado 1	140	30	6,96	8,48	13,56
30	Pulsado 1	140	35	11,61	7,92	15,63

Tabela 5. 34 - Variabilidade das soldas realizadas de modo automático com o processo arame tubular e diferentes velocidades de arame (V_a).

Processo Arame Tubular			Uaj V	Desvio Padrão Relativo (%)		
n°	Transferência	V_a m/min		Penetração	Convexidade	Diluição
1T	Curto-circuito	2,4	19	24,50	10,06	16,94
2T	Curto-circuito	3,2	19	19,26	10,95	7,37
3T	Curto-circuito	4,3	19	16,27	7,97	10,50
4T	Goticular	8,5	33	26,39	5,77	24,88
5T	Goticular	9,5	35	15,67	14,85	18,52
6T	Goticular	10,0	36	14,89	15,52	22,81

Tabela 5. 35 - Variabilidade das soldas realizadas de modo automático com o processo arame tubular com diferentes correntes médias (I_m).

Processo Arame Tubular			Ip* (A)	Desvio Padrão Relativo (%)		
n°	Transferência	I_m (A)		Penetração	Convexidade	Diluição
7T	Pulsado 1	100	280	22,72	10,16	34,21
8T	Pulsado 1	140	280	17,67	5,78	21,68
9T	Pulsado 1	180	280	16,45	9,34	18,80
10T	Pulsado 2	100	350	34,88	4,26	36,86
11T	Pulsado 2	140	350	35,11	5,72	28,50
12T	Pulsado 2	180	350	30,51	5,47	29,02

* As duas ondas pulsadas se diferenciam, principalmente, pela corrente de pulso.

Tabela 5. 36 - Variabilidade das soldas realizadas de modo automático com o processo arame tubular, corrente constante e diferentes distâncias bico de contato peça (DBCP).

Processo Arame Tubular			DBCP (mm)	Desvio Padrão Relativo (%)		
n°	Transferência	Va (m/min)		Penetração	Convexidade	Diluição
13T	Curto-circuito	3,2	10	20,29	4,44	10,66
14T	Curto-circuito	3,2	12	19,26	10,95	17,42
15T	Curto-circuito	3,2	14	23,35	7,69	10,78
16T	Goticular	9,5	14	19,20	5,33	16,94
17T	Goticular	9,5	16	15,67	14,85	18,52
18T	Goticular	9,5	18	17,47	9,97	23,10

Tabela 5. 37 - Variabilidade das soldas realizadas de modo automático com o processo arame tubular, corrente pulsada e diferentes distâncias bico de contato peça (DBCP).

Processo Arame Tubular			DBCP (mm)	Desvio Padrão Relativo (%)		
n°	Transferência	Im (A)		Penetração	Convexidade	Diluição
19T	Pulsado 1	140	14	29,61	19,54	34,24
20T	Pulsado 1	140	16	17,67	5,78	21,68
21T	Pulsado 1	140	18	11,29	14,94	14,41

Pulsado 1, corrente de pulso = 280 A

Tabela 5. 38 - Variabilidade das soldas realizadas de modo automático com arame tubular, corrente constante e diferentes velocidades de soldagem (Vs).

Processo Arame Tubular			Vs cm/min	Desvio Padrão Relativo (%)		
n°	Transferência	Va m/min		Penetração	Convexidade	Diluição
22T	Curto-circuito	3,2	25	14,70	9,41	13,93
23T	Curto-circuito	3,2	30	19,26	10,95	17,42
24T	Curto-circuito	3,2	35	10,51	6,97	20,84
25T	Goticular	9,5	25	25,63	11,39	19,62
26T	Goticular	9,5	30	15,67	14,85	18,52
27T	Goticular	9,5	35	10,22	11,24	13,80

Tabela 5. 39 - Variabilidade das soldas realizadas de modo automático com arame tubular, corrente pulsada e diferentes velocidades de soldagem (Vs).

n°	Transferência	Processo Arame Tubular	Vs cm/min	Desvio Padrão Relativo (%)		
		Im A		Penetração	Convexidade	Diluição
28T	Pulsado 1	140	25	23,35	8,96	27,62
29T	Pulsado 1	140	30	17,67	5,78	21,68
30T	Pulsado 1	140	35	16,07	7,26	18,25

Pulsado 1, corrente de pulso 280 A

5.4- COMPARAÇÃO DA VARIABILIDADE DAS SOLDAS AUTOMÁTICAS

Com o objetivo de comparar a variabilidade das soldas realizadas de forma automática pelos processos MIG/MAG e arame tubular com transferência pelos modos curto-circuito, goticular e pulsado foram plotados os valores do desvio padrão relativo, da penetração, da convexidade e da diluição destas soldas apresentados da Tabela 5. 28 até a Tabela 5. 39.

Deste modo o gráfico da Figura 5.25 mostra que as variabilidades da penetração das soldas realizadas com transferência por curto-circuito e goticular com diferentes velocidades do arame e o processo arame tubular foram maiores do que nas soldas realizadas com o processo MIG/MAG.

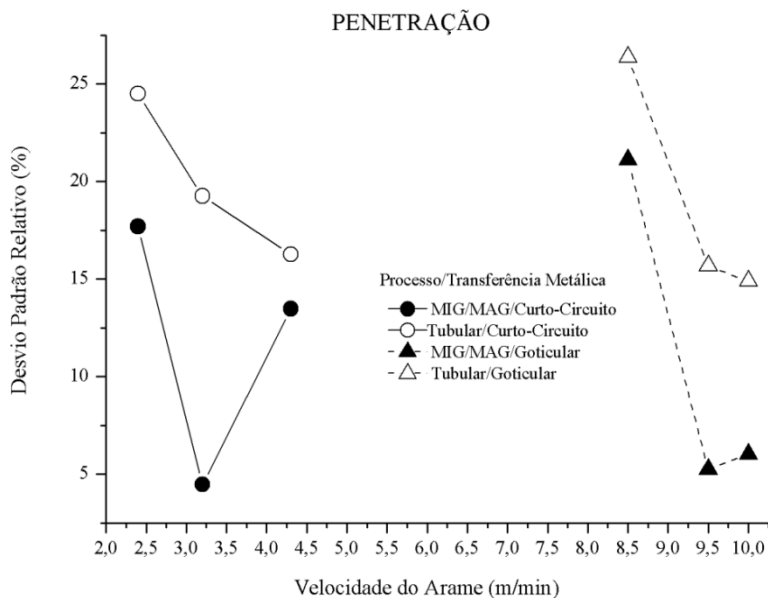


Figura 5. 25 - Desvio padrão relativo da penetração das soldas realizadas com diferentes velocidades do arame.

Da mesma maneira no gráfico da Figura 5.26 que apresenta o desvio padrão relativo da penetração das soldas realizadas pelo modo pulsado e diferentes correntes médias observa-se que a variabilidade da penetração das soldas realizadas com o processo arame tubular, foi muito maior do que nas soldas realizadas com o processo MIG/MAG. Além disto, este gráfico mostra ainda que as maiores variabilidades da penetração ocorreram para as soldas realizadas com o processo arame tubular e corrente de pulso de maior valor ($I_p = 350$ A, pulsado 2).

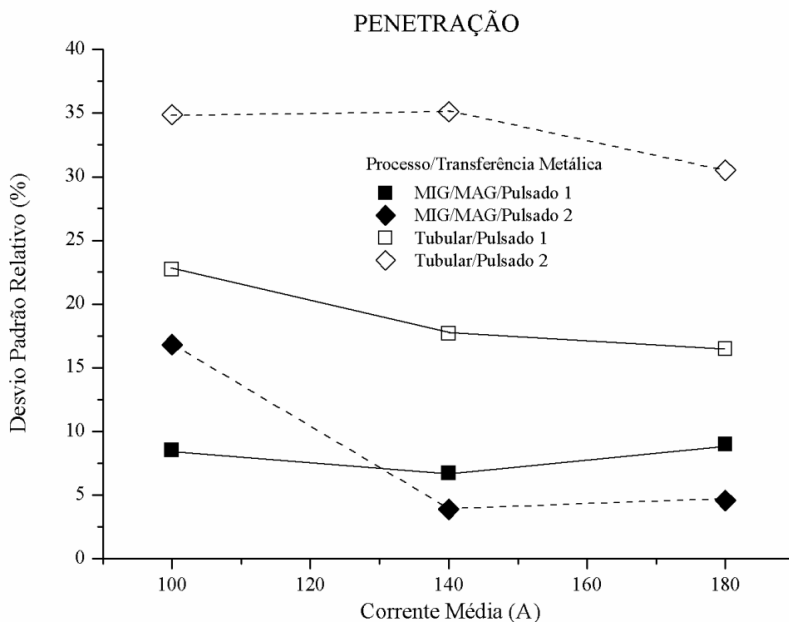


Figura 5. 26 - Desvio padrão relativo da penetração das soldas realizadas com diferentes correntes médias.

Há ainda que salientar que as variabilidades da penetração das soldas realizadas pelos três modos, de transferência (curto-circuito, goticular e pulsado) com o processo arame tubular foram maiores do que nas soldas realizadas pelos três modos, porém com o processo MIG/MAG.

Já o gráfico da Figura 5.27 mostra que as variabilidades da convexidade das soldas realizadas com transferência por curto-circuito e diferentes velocidades do arame foram maiores com o processo MIG/MAG do que com o processo arame tubular e mostra ainda que as variabilidades da convexidade das soldas realizadas com transferência goticular com diferentes velocidades do arame e o processo arame

tubular foram maiores do que nas soldas realizadas com o processo MIG/MAG.

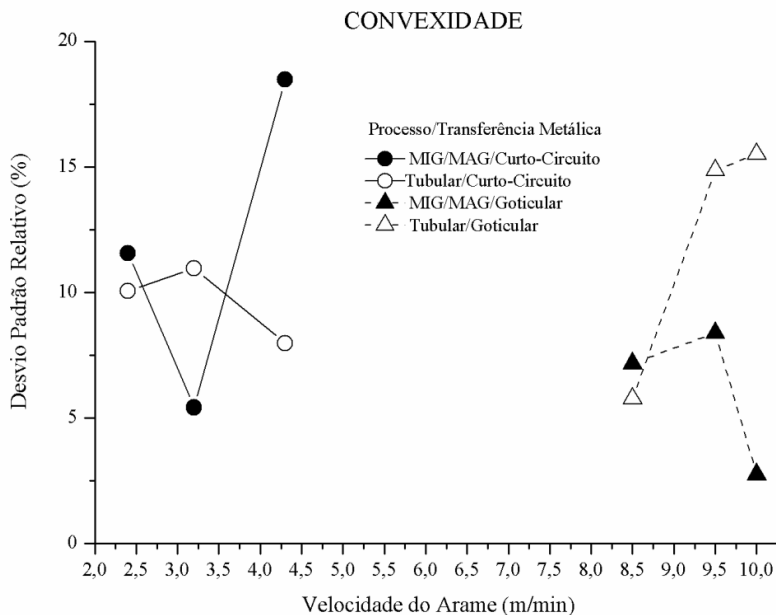


Figura 5. 27 - Desvio padrão relativo da convexidade das soldas realizadas com diferentes velocidades do arame.

No gráfico da Figura 5.28 observa-se que as variabilidades da convexidade das soldas realizadas pelo modo pulsado com diferentes correntes médias foram muito maiores com o arame tubular do que com o MIG/MAG. Além disto, este gráfico mostra ainda que as maiores variabilidades da convexidade ocorreram para as soldas realizadas com arame tubular e a corrente de pulso de maior valor ($I_p = 350$ A, pulsado 2).

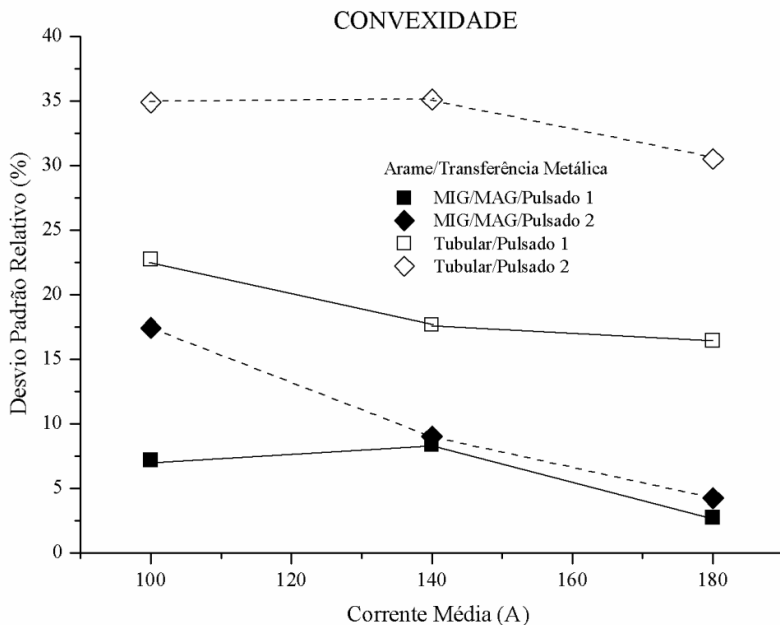


Figura 5. 28 - Desvio padrão relativo da convexidade das soldas realizadas com diferentes correntes médias.

O gráfico da Figura 5.29 mostra que a faixa de variabilidade da diluição das soldas realizadas com transferência pelos modos curto-circuito e goticular com diferentes velocidades do arame e o processo MIG/MAG foi maior do que nas soldas com o processo arame tubular.

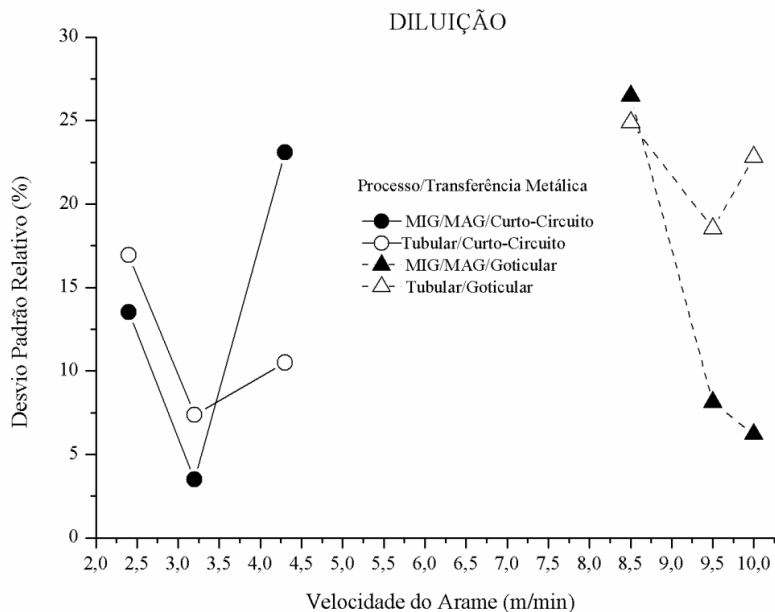


Figura 5. 29 - Desvio padrão relativo da diluição das soldas realizadas com diferentes velocidades do arame.

No gráfico da Figura 5.30 observa-se que as variabilidades da diluição nas soldas realizadas pelo modo pulsado com diferentes correntes médias e o processo arame tubular, foram muito maiores do que nas soldas realizadas com o processo MIG/MAG. Além disto, este gráfico mostra ainda que as maiores variabilidades da diluição ocorreram para as soldas realizadas com arame tubular e a corrente de pulso de maior valor ($I_p = 350$ A, pulsado 2).

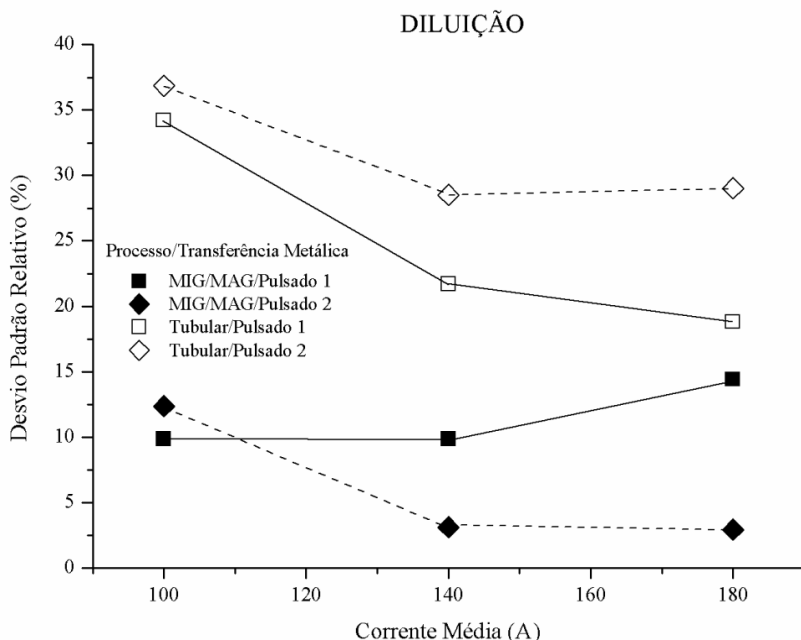


Figura 5. 30 - Desvio padrão relativo da diluição das soldas realizadas com diferentes correntes médias.

Finalmente há que salientar que as variabilidades da penetração, da convexidade e da diluição das soldas realizadas pelo modo pulsado com o processo arame tubular foram maiores do que nas soldas realizadas pelo mesmo modo, porém com o processo MIG/MAG, independente da corrente de pulso utilizada. Há que salientar ainda que as variabilidades da penetração, da convexidade e da diluição das soldas realizadas com arame tubular e modo pulsado 2 (corrente de pulso 350 A) foram maiores do que nas soldas realizadas com arame tubular e modo pulsado 1 (corrente de pulso 280 A).

O gráfico da Figura 5.31 mostra que mesmo para diferentes distâncias bico de contato peça as variabilidades da penetração das soldas realizadas com o processo arame tubular foram maiores do que com o processo MIG/MAG.

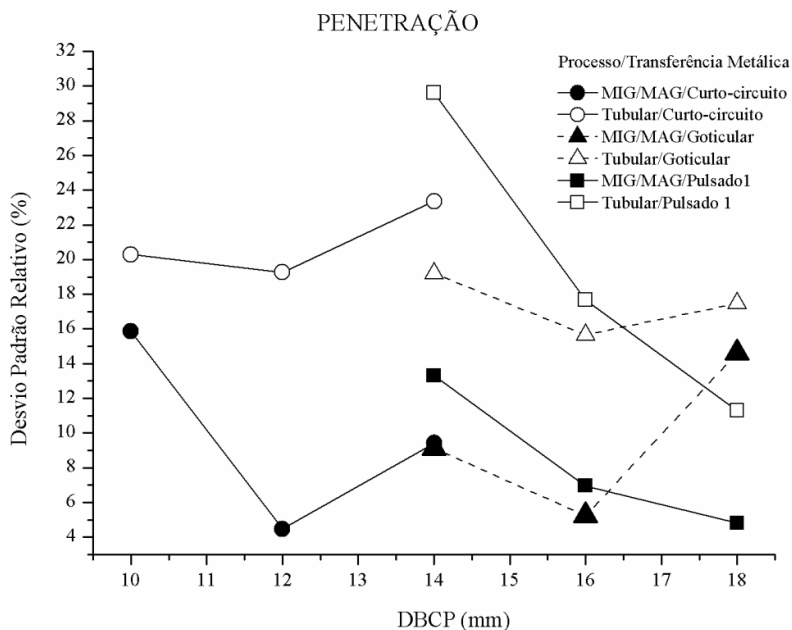


Figura 5. 31 - Desvio padrão relativo da penetração das soldas realizadas com diferentes DBCPs.

De outra parte, no gráfico da Figura 5.32 fica mais difícil identificar se as variabilidades da convexidade das soldas realizadas com diferentes distâncias bico de contato peça foram maior para o processo MIG/MAG ou para o processo arame tubular.

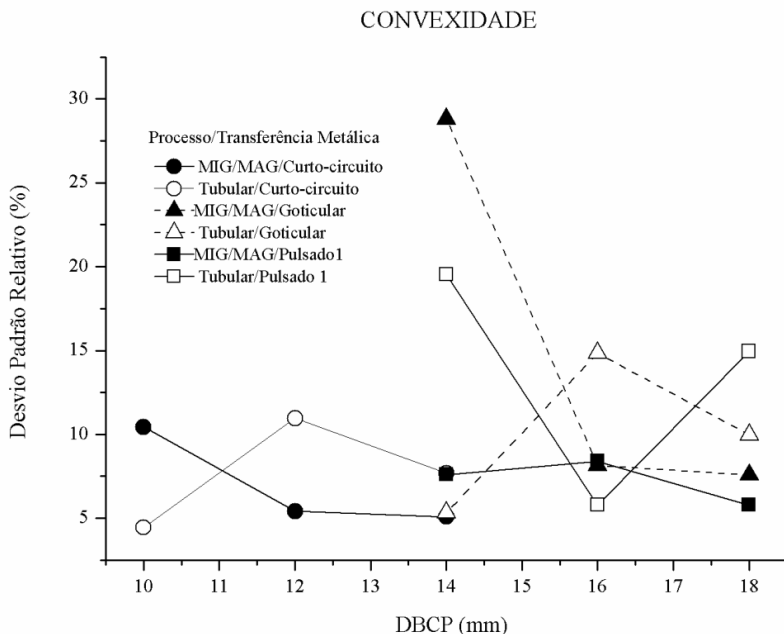


Figura 5. 32 - Desvio padrão relativo da convexidade das soldas realizadas com diferentes DBCPs.

Finalmente o gráfico da Figura 5.33 mostra que a variabilidade da diluição das soldas realizadas com diferentes distâncias bico de contato peça foi maior para o processo arame tubular do que para o processo MIG/MAG.

Além disso, há que salientar que as variabilidades da diluição, na transferência pelo modo pulsado tanto para o processo MIG/MAG como para o processo arame tubular diminuíram com o aumento da DBCP.

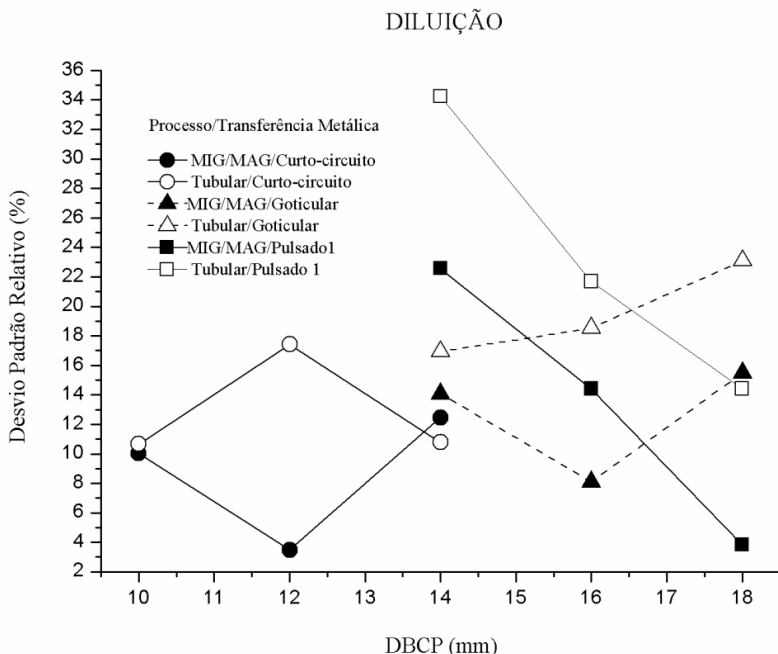


Figura 5. 33 - Desvio padrão relativo da diluição das soldas realizadas com diferentes DBCPs.

Com a finalidade de comparar a variabilidade das soldas realizadas com os processos MIG/MAG e arame tubular com diferentes velocidades de soldagem (condições indicadas na Tabela 5.16, na Tabela 5.17, na Tabela 5.22 e na Tabela 5.23) foram plotados os valores do desvio padrão relativo da penetração, da convexidade e da diluição (apresentados na Tabela 5.30, na Tabela 5.31, na Tabela 5.36 e na Tabela 5.37). Deste modo o gráfico da Figura 5.34 mostra que as variabilidades da penetração das soldas realizadas com a menor velocidade de soldagem foram maior para o processo arame tubular do que para o processo MIG/MAG. Além disto, este gráfico mostra que

para velocidades de soldagem maiores há uma tendência das variabilidades da penetração de soldas com o processo arame tubular, serem menores do que com o processo MIG/MAG.

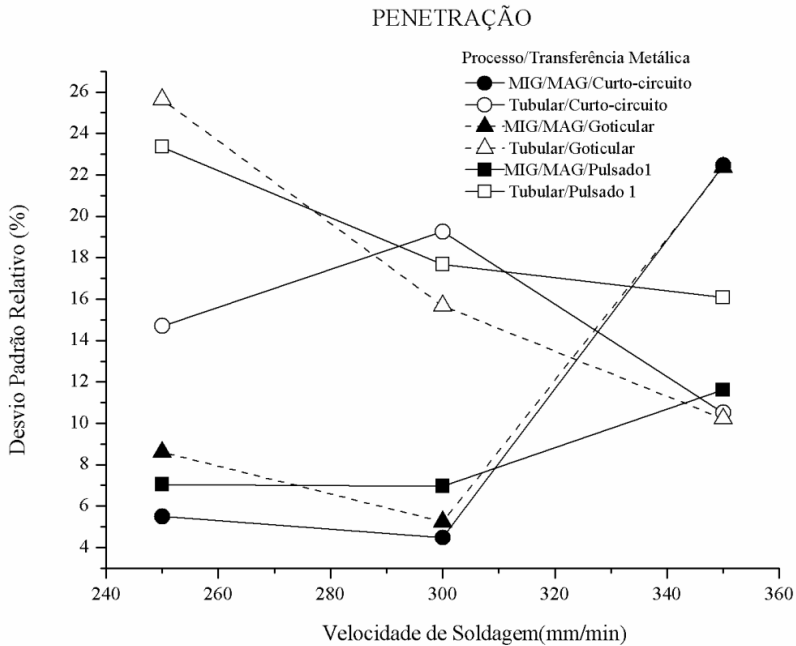


Figura 5. 34 - Desvio padrão relativo da penetração das soldas realizadas com diferentes velocidades de soldagem.

Da mesma maneira o gráfico da Figura 5.35 mostra que as variabilidades da convexidade das soldas realizadas com diferentes velocidades de soldagem e o processo arame tubular foram maiores do que nas soldas realizadas com o processo MIG/MAG.

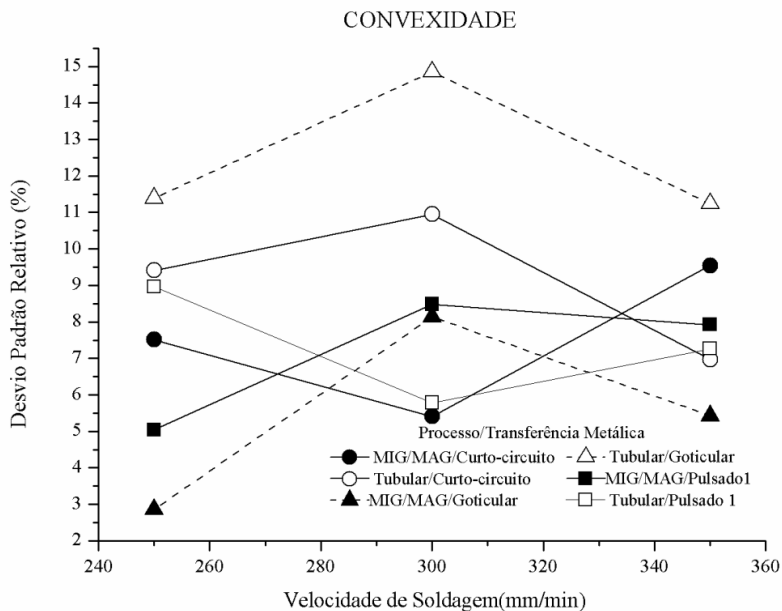


Figura 5. 35 - Desvio padrão relativo da convexidade das soldas realizadas com diferentes velocidades de soldagem.

Finalmente o gráfico da Figura 5.36 mostra que as variabilidades da diluição das soldas realizadas com diferentes velocidades de soldagem e o processo arame tubular foram maiores do que nas soldas realizadas com o processo MIG/MAG. Além disto, observa-se que as variabilidades da diluição, das soldas realizadas com o processo arame tubular, transferência pelos modos goticular e pulsado diminuiu com o aumento da velocidade soldagem. De outra parte as variabilidades da penetração das soldas realizadas com o processo MIG/MAG e os três modos de transferência utilizados cresceu com o aumento da velocidade soldagem.

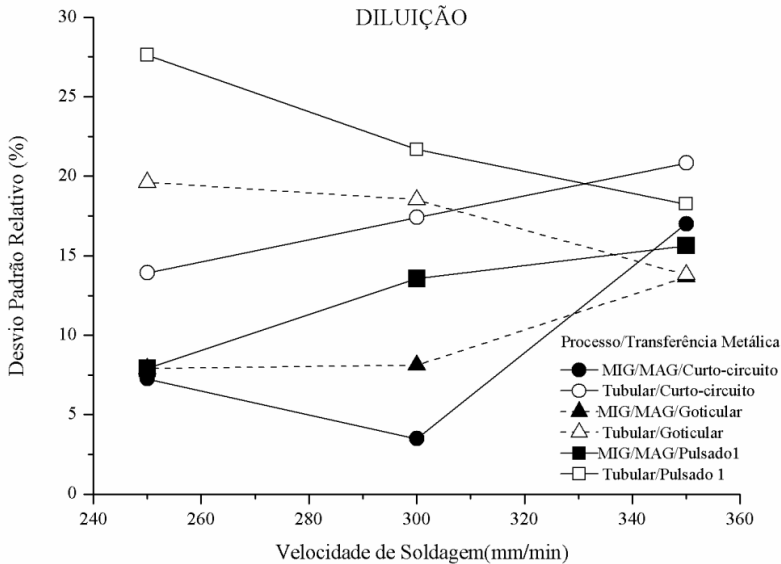


Figura 5. 36 - Desvio padrão relativo da diluição das soldas realizadas com diferentes velocidades de soldagem.

5.5- VARIABILIDADE EM SOLDAS SEMIAUTOMÁTICAS.

Com o objetivo de determinar a variabilidade na geometria e na diluição dos cordões de solda realizados de modo semiautomático, foram executadas soldas utilizando os processos MIG/MAG e arame tubular. Todos estes ensaios (soldas) foram realizados utilizando a técnica de simples deposição sobre chapa e as condições de soldagem indicadas na Tabela 4. 1.

Nas soldas realizadas com transferência pelos modos curto-circuito e goticular os demais parâmetros utilizados foram similares aos das soldas realizadas de modo automático (vide Tabela 5. 40). Nas soldas realizadas pelo modo pulsado não houve formação de cordão de solda ao utilizar a mesma corrente média das soldas automáticas, assim

foram realizados alguns testes exploratórios a partir dos quais se estabeleceu uma corrente média de 200 A (vide Tabela 5.41).

Tabela 5. 40 - Valores das variáveis das soldas realizadas de modo semiautomático e corrente constante.

Solda n°	Transferência Metálica	Va (m/min)	Im (A)	Uaj (V)	Arame (tipo)	DBCP* (mm)
1S	Curto-circuito	3,2	140	17	Maciço	12
2S	Goticular	9,5	320	35	Maciço	16
3S	Curto-circuito	3,2	140	17	Tubular	12
4S	Goticular	9,5	320	35	Tubular	16

* Valor de referência da distância bico de contato peça (DBCP).

Tabela 5. 41 - Valores das variáveis das soldas realizadas de modo semiautomático e corrente pulsada.

Solda n°	Transferência Metálica	Va (m/min)	Im (A)	Ip** (A)	Arame (tipo)	DBCP* (mm)
5S	Pulsado 1	5,5	200	280	Maciço	16
6S	Pulsado 2	5,5	200	350	Maciço	16
7S	Pulsado 1	7,0	200	350	Tubular	16
8S	Pulsado 2	7,0	200	350	Tubular	16

* Valor de referência da distância bico de contato peça (DBCP).

** As duas ondas pulsadas se diferenciam, principalmente, pela corrente de pulso.

5.6- DISTÂNCIA BICO DE CONTATO PEÇA E VELOCIDADE DE SOLDAGEM EM SOLDAS SEMIAUTOMÁTICAS

Na Tabela 5.42 são apresentados o valor médio, o desvio padrão e o desvio padrão relativo da velocidade de soldagem das soldas realizadas de forma semiautomática, calculados a partir dos valores obtidos pelo monitoramento e registro dos deslocamentos horizontais da tocha. Da mesma forma na Tabela 5.43 são apresentados o valor médio, o desvio padrão e o desvio padrão relativo da distância bico de contato peça (DBCP) das soldas realizadas de forma semiautomática, calculados

a partir dos valores obtidos pelo monitoramento e registro dos deslocamentos verticais da tocha. Estes resultados mostram que as variabilidades da velocidade de soldagem foram maiores do que das distâncias bico de contato peça (DBCP).

Tabela 5. 42 - Valor médio, desvio padrão e desvio padrão relativo das velocidades de soldagem das soldas realizadas de forma semiautomática.

Solda n°	Transferência Metálica	Velocidade de Soldagem (cm/min)			
		Processo	Média	DP	DPR (%)
1S	Curto-circuito	MIG/MAG	185,22	28,85	15,58
3S	Curto-circuito	Tubular	93,07	41,90	45,01
2S	Goticular	MIG/MAG	284,03	45,15	15,90
4S	Goticular	Tubular	289,57	64,76	22,36
5S	Pulsado 1	MIG/MAG	195,14	56,99	29,21
6S	Pulsado 2	MIG/MAG	250,83	42,64	17,00
7S	Pulsado 1	Tubular	183,26	43,40	23,68
8S	Pulsado 2	Tubular	185,22	28,85	15,58

DP = Desvio Padrão, DPR= Desvio Padrão Relativo.

Tabela 5. 43 - Valor médio, desvio padrão e desvio padrão relativo da DBCP das soldas realizadas de forma semiautomática.

Solda n°	Transferência Metálica	Distância Bico de Contato Peça (mm)			
		Processo	Média	DP	DPR (%)
1S	Curto-circuito	MIG/MAG	15,15	0,30	1,97
3S	Curto-circuito	Tubular	11,96	0,22	1,86
2S	Goticular	MIG/MAG	18,19	1,15	6,31
4S	Goticular	Tubular	17,04	0,65	3,83
5S	Pulsado 1	MIG/MAG	19,78	1,52	7,67
6S	Pulsado 2	MIG/MAG	17,43	0,91	5,20
7S	Pulsado 1	Tubular	15,74	0,91	5,75
8S	Pulsado 2	Tubular	15,15	0,30	1,97

DP = Desvio Padrão, DPR = Desvio Padrão Relativo.

5.7- RESPOSTAS DAS SOLDAS SEMIAUTOMÁTICAS

Na Tabela 5.44 e Tabela 5.45, são apresentadas as respostas das soldas realizadas de forma semiautomática.

Tabela 5. 44 – Respostas das soldas realizadas de modo semiautomático e corrente constante.

Solda - Seção	Área Reforço (mm²)	Área Penetração (mm²)	Altura Reforço (mm)	Penetração (mm)	Largura (mm)
1-1	32,98	0,00	4,72	0,00	6,64
1-2	33,55	0,00	5,17	0,00	5,88
1-3	20,66	1,10	4,41	0,64	3,95
1-4	22,54	0,89	4,50	0,51	3,66
1-5	21,08	0,81	4,33	0,46	4,41
2-1	36,98	4,71	4,14	0,81	12,03
2-2	34,55	5,48	4,20	0,76	11,56
2-3	30,73	7,93	3,70	1,47	11,52
2-4	31,86	9,28	3,87	1,60	11,98
2-5	22,81	6,65	2,49	1,30	12,74
3-1	10,74	0,71	3,40	0,39	4,00
3-2	13,32	0,00	3,65	0,00	3,27
3-3	16,17	0,00	3,95	0,00	4,75
3-4	11,41	0,00	3,31	0,00	2,80
3-5	9,28	1,34	2,46	0,68	5,64
4-1	25,31	4,54	2,67	0,51	12,73
4-2	27,12	5,23	2,88	0,85	12,05
4-3	22,45	4,26	2,72	0,72	12,39
4-4	28,07	3,29	2,93	0,38	13,11
4-5	24,91	0,94	2,72	0,47	12,90

Tabela 5. 45 - Respostas das soldas modo semiautomático e corrente pulsada.

Solda - Seção	Área Reforço (mm²)	Área Penetração (mm²)	Altura Reforço (mm)	Penetração (mm)	Largura (mm)
5-1	32,69	0,00	5,05	0,00	7,27
5-2	29,07	0,00	5,03	0,00	6,10
5-3	25,03	0,00	4,54	0,00	6,73
5-4	23,86	1,04	4,41	0,46	6,39
5-5	26,58	0,00	4,46	0,00	6,98
6-1	25,54	0,00	3,64	0,00	9,71
6-2	19,55	0,00	3,70	0,00	7,57
6-3	22,32	0,00	3,78	0,00	8,53
6-4	20,09	0,00	3,32	0,00	7,90
6-5	20,34	0,00	3,49	0,00	7,61
7-1	19,31	0,00	3,86	0,00	4,58
7-2	11,91	0,00	3,39	0,00	2,97
7-3	12,85	1,48	3,48	0,55	4,41
7-4	19,49	0,48	3,99	0,25	5,73
7-5	23,21	0,00	4,54	0,00	6,15
8-1	19,31	0,00	3,86	0,00	4,58
8-2	11,91	0,00	3,39	0,00	2,97
8-3	12,85	1,48	3,48	0,55	4,41
8-4	19,49	0,48	3,99	0,25	5,73
8-5	23,21	0,00	4,54	0,00	6,15

Na Tabela 5.46 e Tabela 5.47 são apresentados os valores da penetração, convexidade e diluição, calculados a partir das respostas mostradas nas duas tabelas anteriores, bem como a média, o desvio padrão e o desvio padrão relativo obtidos em cada uma das cinco

amostras retiradas de cada um dos cordões de solda realizados de forma semiautomática.

Tabela 5. 46 - Determinação da variabilidade das soldas realizadas de modo semiautomático e corrente constante.

Transferência por Curto-Circuito e Goticular				
Solda nº	Seções	Penetração	Convexidade	Diluição
1S	1	0,00	0,71	0,00
	2	0,00	0,88	0,00
	3	0,64	1,12	0,05
	4	0,51	1,23	0,04
	5	0,46	0,98	0,04
Média		0,40	1,05	0,03
Desvio Padrão		0,28	0,15	0,02
Desvio Padrão Relativo (%)		69,28	14,57	69,50
2S	1	0,81	0,34	0,11
	2	0,76	0,36	0,14
	3	1,47	0,32	0,21
	4	1,60	0,32	0,23
	5	1,30	0,20	0,23
Média		1,19	0,31	0,18
Desvio Padrão		0,38	0,07	0,05
Desvio Padrão Relativo (%)		32,27	21,33	29,12
3S	1	0,39	0,85	0,06
	2	0,00	1,12	0,00
	3	0,00	0,83	0,00
	4	0,00	1,18	0,00
	5	0,68	0,44	0,13
Média		0,21	0,88	0,04
Desvio Padrão		0,31	0,29	0,06
Desvio Padrão Relativo (%)		145,07	33,36	149,61
4S	1	0,51	0,21	0,15
	2	0,85	0,24	0,16
	3	0,72	0,22	0,16
	4	0,38	0,22	0,10
	5	0,47	0,21	0,04
Média		0,59	0,22	0,12
Desvio Padrão		0,19	0,01	0,05
Desvio Padrão Relativo (%)		32,97	5,37	43,64

Tabela 5.47 - Determinação da variabilidade das soldas realizadas de modo semiautomático e corrente pulsada.

Transferência pelo modo pulsado				
Solda n°	Seções	Penetração	Convexidade	Diluição
5S	1	0,00	0,69	0,00
	2	0,00	0,82	0,00
	3	0,00	0,67	0,00
	4	0,46	0,69	0,04
	5	0,00	0,64	0,00
Média		0,09	0,70	0,01
Desvio Padrão		0,21	0,07	0,02
Desvio Padrão Relativo (%)		223,61	10,01	223,61
6S	1	0,00	0,37	0,00
	2	0,00	0,49	0,00
	3	0,00	0,44	0,00
	4	0,00	0,42	0,00
	5	0,00	0,46	0,00
Média		0,00	0,44	0,00
Desvio Padrão		0,00	0,04	0,00
Desvio Padrão Relativo (%)		-	9,79	-
7S	1	0,00	0,84	0,00
	2	0,00	1,14	0,00
	3	0,55	0,79	0,10
	4	0,25	0,70	0,02
	5	0,00	0,74	0,00
Média		0,16	0,84	0,03
Desvio Padrão		0,24	0,18	0,04
Desvio Padrão Relativo (%)		152,13	20,96	175,66
8S	1	0,00	0,82	0,00
	2	0,23	0,85	0,01
	3	0,38	0,91	0,04
	4	0,30	0,76	0,04
	5	0,43	0,79	0,03
Média		0,34	0,83	0,03
Desvio Padrão		0,09	0,07	0,01
Desvio Padrão Relativo (%)		26,31	7,93	42,53

A seguir na Tabela 5. 48 e na Tabela 5. 49 são apresentados os valores do desvio padrão relativo (indicativo da variabilidade) da penetração, da convexidade e da diluição das soldas realizadas de forma semiautomática.

Tabela 5. 48 - Variabilidade das soldas realizadas de modo semiautomático e corrente constante.

Transferência curto-circuito/goticular				Desvio Padrão Relativo (%)		
n°	Processo	Va (m/min)	Uaj (V)	Penetração	Convexidade	Diluição
1S	MIG/MAG	3,2	17	69,28	14,57	69,50
2S	MIG/MAG	9,5	35	32,27	21,33	29,12
3S	Tubular	3,2	17	145,07	33,36	149,61
4S	Tubular	9,5	35	32,97	5,37	43,64

Tabela 5. 49 - Variabilidade das soldas realizadas de modo semiautomático e corrente pulsada.

Transferência corrente pulsada				Desvio Padrão Relativo (%)		
n°	Processo	Im (A)	Ip (A)	Penetração	Convexidade	Diluição
5S	MIG/MAG	200	280	223,61	10,01	223,61
6S	MIG/MAG	200	350	-	9,79	-
7S	Tubular	200	280	152,13	20,96	175,66
8S	Tubular	200	350	26,31	7,93	42,53

5.8- COMPARAÇÃO DA VARIABILIDADE DAS SOLDAS SEMIAUTOMÁTICAS

A fim de comparar a variabilidade das soldas realizadas de forma semiautomática com os processos MIG/MAG e arame tubular, com diferentes velocidades de arame para os modos de transferência por curto-circuito e goticular foram colocados em gráficos os valores do desvio padrão relativo da penetração, da convexidade e da diluição (apresentados na Tabela 5. 48). Deste modo o gráfico da Figura 5.37 mostra que a variabilidade da penetração, da convexidade e da diluição das soldas realizadas de forma semiautomática com os dois tipos de processo foi maior para as soldas realizadas pelo modo de transferência por curto circuito do que pelo modo goticular, com exceção da variabilidade da convexidade das soldas realizadas com o processo MIG/MAG.

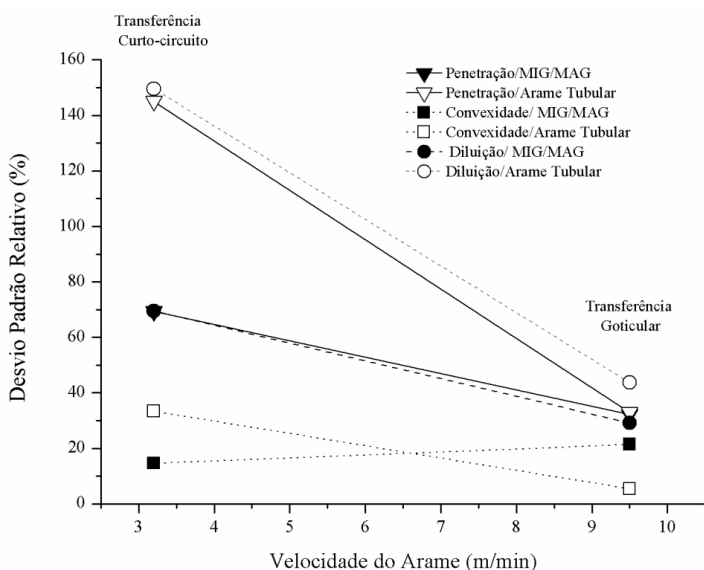


Figura 5. 37 - Variabilidade das soldas realizadas de forma semiautomática, corrente constante e diferentes velocidades do arame.

Com a finalidade de também comparar a variabilidade das soldas realizadas com o processo MIG/MAG e o processo arame tubular com transferência pelo modo pulsado e diferentes correntes de pulso foram colocados em gráficos os valores do desvio padrão relativo da penetração, da convexidade e da diluição (apresentados na Tabela 5.49). Deste modo o gráfico da Figura 5.38 mostra que a variabilidade da penetração e da diluição das soldas realizadas com o processo arame tubular e corrente de pulso 280 A foi maior do que para a corrente de pulso 350 A. O gráfico da Figura 5.38 mostra também que as variabilidades da convexidade das soldas realizadas com o processo MIG/MAG foram iguais para as duas correntes de pulso utilizadas, e que a variabilidade da convexidade das soldas realizadas com o processo arame tubular e corrente de pulso 280 A foi maior do que para a corrente de pulso 350 A. O gráfico da Figura 5.38 mostra ainda que para as condições utilizadas na solda realizada de forma semiautomática com o processo MIG/MAG modo pulsado e corrente de pulso 350 A não ocorreu penetração da solda e por consequência também não ocorreu diluição.

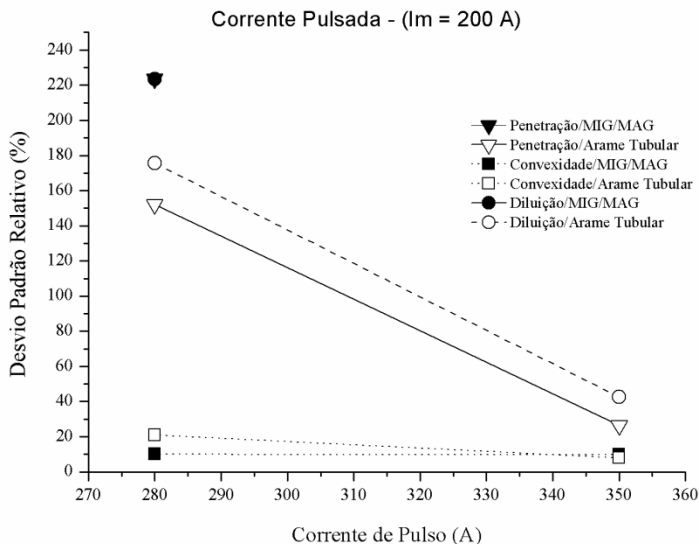


Figura 5. 38 - Variabilidade das soldas realizadas de forma semiautomática, corrente pulsada e dois níveis de corrente de pulso.

5.9- COMPARAÇÃO DA VARIABILIDADE DAS SOLDAS AUTOMÁTICAS E SEMIAUTOMÁTICAS

Com a finalidade de comparar a variabilidade das soldas realizadas de forma semiautomática e de forma automática, foram colocados em gráficos os valores do desvio padrão relativo da penetração, da convexidade e da diluição das soldas realizadas com transferência por curto-circuito (com $V_a = 3,2$ m/min) e goticular (com $V_a = 9,5$ m/min). Desta maneira o gráfico da Figura 5.39 mostra que as variabilidades da penetração das soldas realizadas de forma semiautomática foram maiores do que para as soldas realizadas de forma automática. Este gráfico mostra ainda que as variabilidades da penetração das soldas realizadas de forma semiautomática utilizando o processo MIG/MAG e o processo arame tubular e transferência goticular são iguais e menores que as variabilidades da penetração das

soldas realizadas de forma semiautomática utilizando transferência por curto circuito.

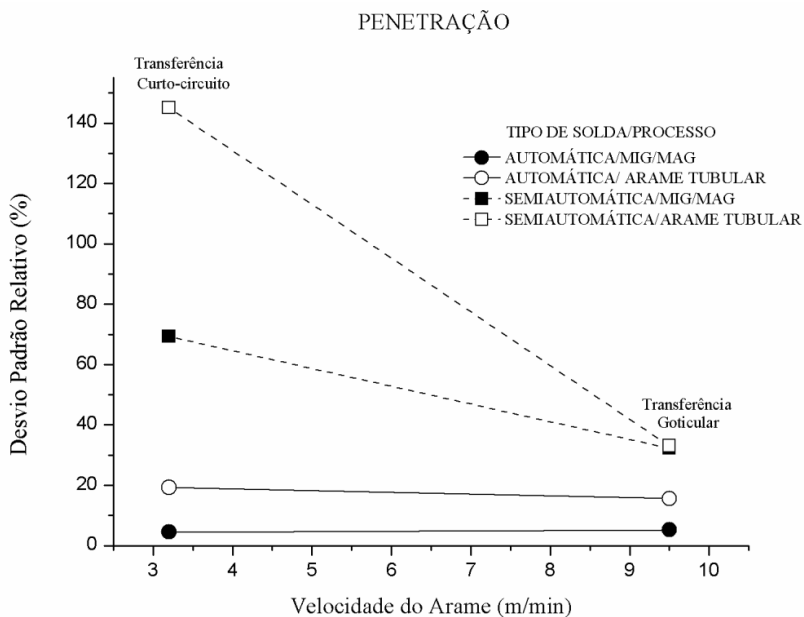


Figura 5. 39 – Variabilidade da penetração das soldas realizadas de forma automática e semiautomática com transferência por curto-circuito e goticular.

Da mesma maneira o gráfico da Figura 5.40 mostra que as variabilidades da convexidade das soldas realizadas com transferência por curto-circuito de forma semiautomática, com os processos MIG/MAG e arame tubular são maiores do que as das soldas realizadas de forma automática. Este gráfico mostra ainda que a menor variabilidade da convexidade ocorreu para a solda realizada de forma semiautomática com o processo arame tubular e transferência pelo modo goticular.

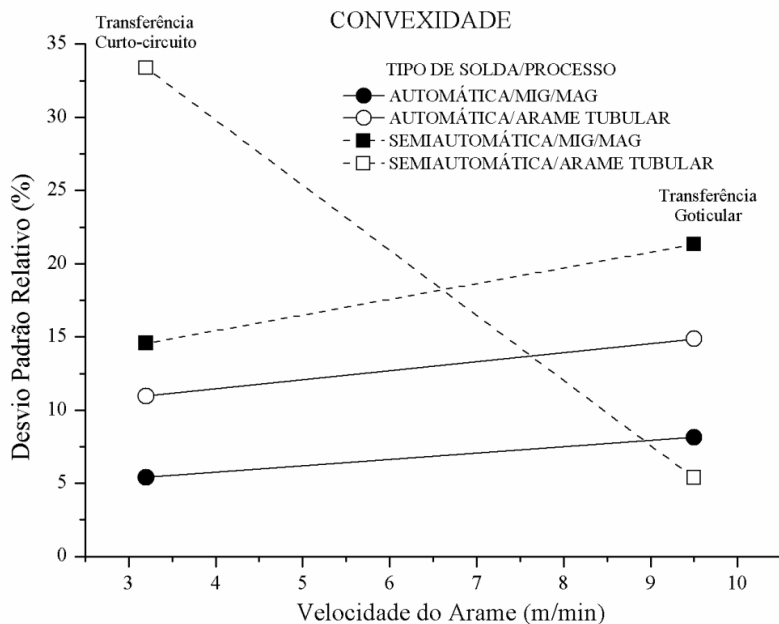


Figura 5. 40 - Variabilidade da convexidade das soldas realizadas de forma automática e semiautomática com transferência por curto-circuito e gótica.

O gráfico da Figura 5.41 mostra que as variabilidades da diluição das soldas realizadas com transferência por curto-circuito de forma semiautomática utilizando os processos MIG/MAG e arame tubular são maiores do que das soldas realizadas de forma automática. Este gráfico mostra ainda que as variabilidades da diluição das soldas realizadas com transferência gótica de forma semiautomática utilizando os processos MIG/MAG e arame tubular são maiores do que das soldas realizadas de forma automática.

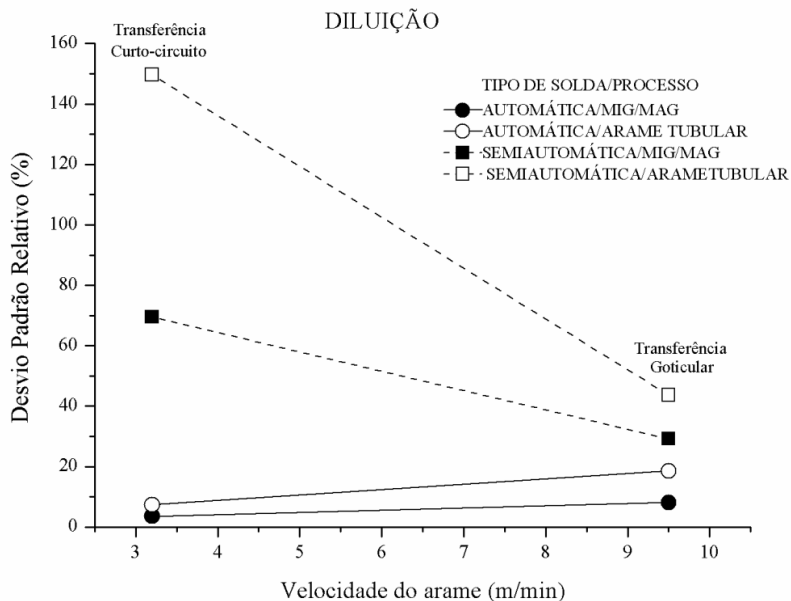


Figura 5. 41 - Variabilidade da diluição das soldas realizadas de forma automática e semiautomática com transferência por curto-circuito e goticular.

Há ainda que salientar, que as variabilidades da penetração, convexidade e diluição das soldas realizadas com os dois tipos de processo e forma semiautomática com modo de transferência goticular foram menores do que as variabilidades das soldas realizadas com transferência por curto-circuito, com exceção da variabilidade da convexidade para o processo MIG/MAG.

Ainda com a finalidade de comparar a variabilidade das soldas realizadas de forma semiautomática e de forma automática com transferência pelo modo pulsado (com $I_m = 200$ A e 180 A respectivamente) foram colocados em gráficos os valores do desvio padrão relativo da penetração, da convexidade e da diluição destas

soldas. Assim o gráfico da Figura 5.42 mostra que a variabilidade da penetração da solda realizada de forma semiautomática, corrente de pulso 280 A e o processo arame tubular foi maior que a variabilidade das soldas realizadas de forma automática e os processos arame tubular e MIG/MAG. Este gráfico mostra ainda que a variabilidade da penetração da solda realizada de forma semiautomática com o processo arame tubular e corrente de pulso de 350 A, foi menor do que da solda realizada com a corrente de pulso de 280 A. Há ainda que salientar, que para as condições utilizadas, a solda realizada de forma semiautomática com o processo MIG/MAG modo pulsado e corrente de pulso 350 A não ocorreu penetração da solda.

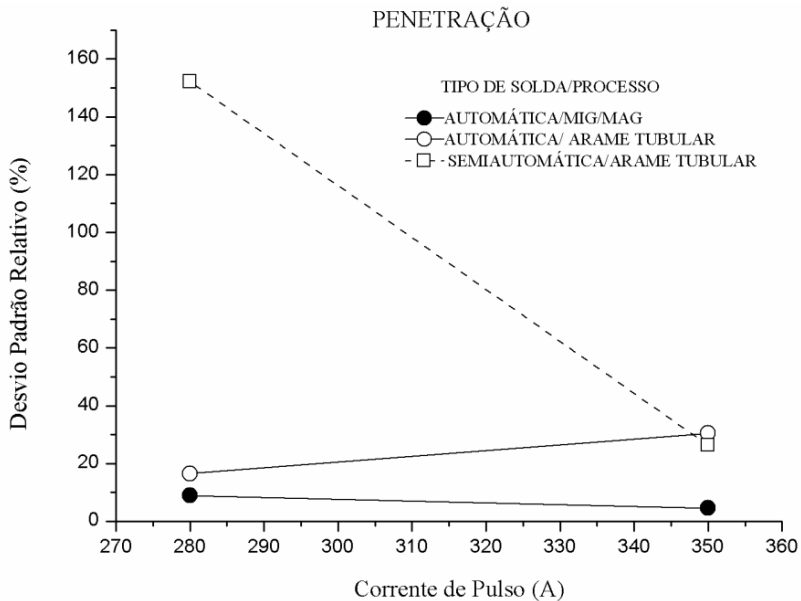


Figura 5. 42 - Variabilidade da penetração das soldas realizadas de forma automática e semiautomática com transferência pelo modo pulsado.

Da mesma maneira o gráfico da Figura 5.43 mostra que as variabilidades da convexidade das soldas realizadas de forma semiautomática com os processos MIG/MAG e arame tubular foram maiores que as variabilidades da convexidade das soldas realizadas de forma automática. Este gráfico mostra ainda que as variabilidades da convexidade das soldas realizadas com o processo MIG/MAG aumentaram com a corrente de pulso e para as soldas realizadas com o arame tubular elas diminuíram.

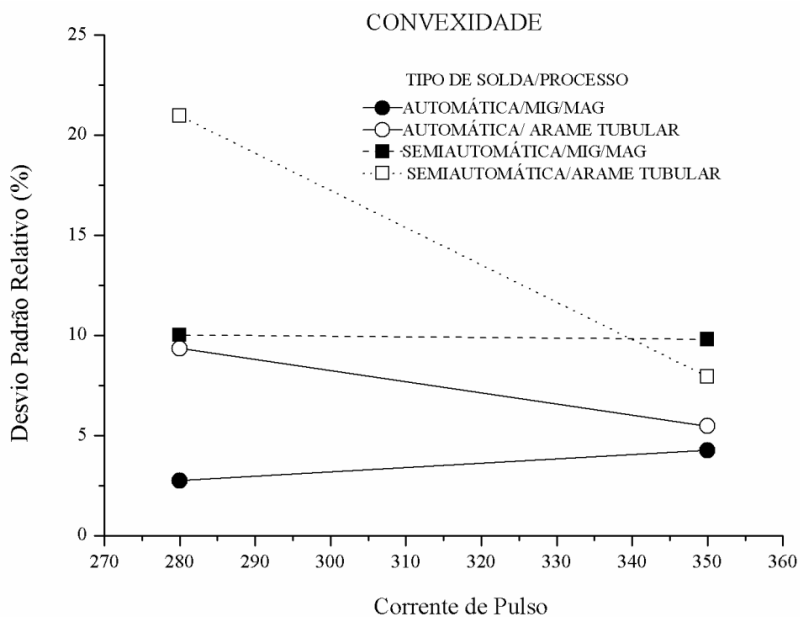


Figura 5. 43- Variabilidade da convexidade das soldas realizadas de forma automática e semiautomática com transferência pelo modo pulsado.

Finalmente o gráfico da Figura 5.44 mostra que as variabilidades da diluição das soldas realizadas com processo arame tubular de forma semiautomática foram maiores do que a variabilidade da diluição das

soldas realizadas de forma automática e os processos arame tubular e MIG/MAG. Este gráfico mostra ainda que a variabilidade da diluição das soldas realizadas de forma semiautomática e o processo arame tubular diminuiu com o aumento da corrente de pulso. Vale aqui lembrar mais uma vez que para as condições utilizadas nas soldas realizadas de forma semiautomática com o processo MIG/MAG modo pulsado e corrente de pulso 350 A não ocorreu penetração da solda e por consequência também não ocorreu diluição.

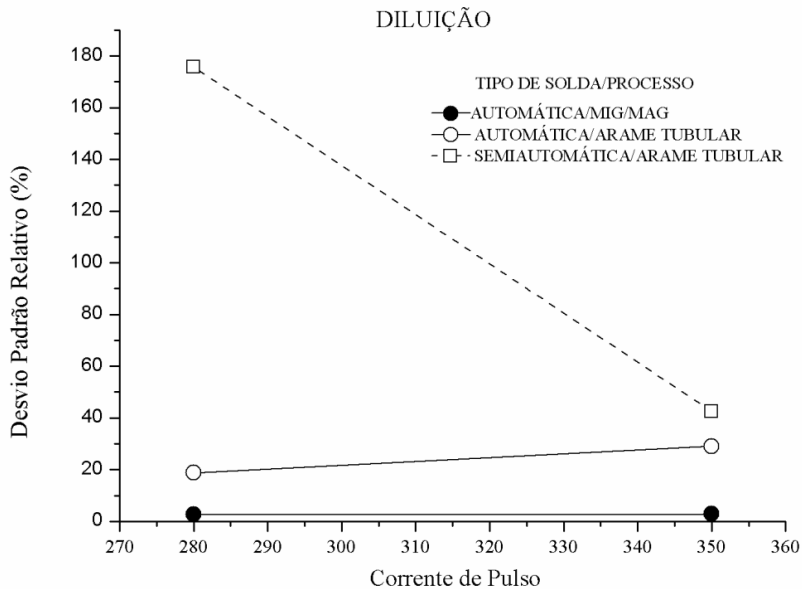


Figura 5. 44 - Variabilidade da diluição das soldas realizadas de forma automática e semiautomática com transferência pelo modo pulsado.

6- CONCLUSÕES

Para as condições e parâmetros de soldagem utilizados neste trabalho, obtemos as seguintes conclusões:

6.1- CONCLUSÕES GERAIS:

- 1) Os parâmetros, desvio padrão relativo (DPR) dos períodos de transferência metálica e dos picos de corrente são eficazes e altamente sensíveis para quantificar a estabilidade do arco. Como mostram, por exemplo, os resultados das soldas realizadas com $V_a = 2,4$ m/min, $U_{aj} = 18$ V que indicam menor variabilidade (menor DPR) e, portanto maior estabilidade do arco da solda realizada com “efeito indutivo” 50 do que com os “efeitos indutivos” 20 e 80 (vide tabela 5.5), confirmados pela menor variabilidade da geometria e da diluição destes cordões de solda (vide tabela 5.4).
- 2) A condição de transferência com maior regularidade e ou estabilidade para o modo curto circuito depende não só do valor da tensão ajustada como também da indutância como indicam o desvio padrão relativo (variabilidade) dos períodos de transferência metálica e dos picos de corrente, que para os três níveis de tensão utilizados neste trabalho foram menores para o “efeito indutivo” ajustado em 50 (valor médio da fonte).
- 3) O valor da tensão ajustada (U_{aj}) que determina a maior estabilidade na transferência pelo modo curto-circuito independe da velocidade de soldagem e aumenta com a velocidade do arame: para $V_a = 2,4$

m/min a melhor condição foi $U_{aj} = 16$ V, para $V_a = 3,2$ m/min foi $U_{aj} = 17$ V e para $V_a = 4,3$ m/min foi $U_{aj} = 18$ V.

- 4) Os valores de tensão que determinam maior estabilidade na transferência pelo modo curto-circuito resultam em menores valores de corrente média, por exemplo, nas soldas realizadas com velocidade de soldagem de 30 cm/min e velocidade de arame 2,4 m/min o menor valor de corrente média (96,5A) ocorreu para a tensão ajustada em 16 V.

6.2- CONCLUSÕES QUANTO À VARIABILIDADE NAS SOLDAS AUTOMÁTICAS:

- 5) A variabilidade da penetração das soldas realizadas com o processo arame tubular e transferência pelos modos curto-circuito, goticular, pulsado (DPR 15% a 25%, 15% a 27,5% e 15% a 35%, respectivamente) foi maior do que nas realizadas pelos mesmos modos, porém com o processo MIG/MAG (DPR 2,5% a 17,5%, 2,5% a 22,5% e 2,5% a 17,5%, respectivamente).
- 6) A variabilidade da penetração, da convexidade e da diluição das soldas realizadas com corrente pulsada foi maior com o processo arame tubular (DPR 17,5% a 35%; 17,5% a 35% e 17,5% a 37,5% respectivamente) do que com o processo MIG/MAG (DPR 2,5% a 17,5%; 2,5% a 17,5% e 2,5% a 15% respectivamente).
- 7) A variabilidade da penetração, da convexidade e da diluição das soldas realizadas com o processo arame tubular e corrente pulso de 350 A (DPR 30% a 35%; 27,5% a 35% e 30% a 37,5% respectivamente) foi maior do que nas realizadas com corrente de

pulso de 280 A (DPR 17,5% a 22,5%; 17,5% a 22,5% e 17,5% a 35% respectivamente).

- 8) Os resultados deste estudo mostraram que a variabilidade da geometria e da diluição dos cordões de solda depende do processo, e é maior para o processo arame tubular.

6.3- CONCLUSÕES QUANTO À VARIABILIDADE NAS SOLDAS SEMIAUTOMÁTICAS:

- 9) A variabilidade da penetração, da convexidade e da diluição das soldas realizadas com o processo arame tubular foi maior nas soldas com transferência por curto circuito (DPR 145%, 33% e 150%, respectivamente) do que nas com transferência goticular (DPR 30%, 5% e 40%).
- 10) A variabilidade da penetração, da convexidade e da diluição das soldas realizadas com corrente pulsada e o processo arame tubular foi maior para as soldas realizadas com corrente de pulso de 280 A (DPR de 152,13; 20,96 e 175,66% respectivamente) do que com corrente de pulso de 350 A (DPR de 26,31; 7,93 e 42,53% respectivamente).

6.4- CONCLUSÕES QUANTO À VARIABILIDADE DAS SOLDAS SEMIAUTOMÁTICAS VERSUS AUTOMÁTICAS:

- 11) A variabilidade da penetração, convexidade e diluição das soldas realizadas com transferência por curto-circuito forma semiautomática com os processos arame tubular (DPR 145%, 33% e 150% respectivamente) e MIG/MAG (DPR 70%, 15% e 70% respectivamente) foram maiores do que nas realizadas de forma

automática com os processos arame tubular (DPR 20%, 10% e 7,5% respectivamente) e com o processo MIG/MAG (DPR 2,5%, 5% e 5% respectivamente).

- 12) A variabilidade da penetração, convexidade e diluição das soldas realizadas de forma semiautomática com os processos arame tubular e MIG/MAG com transferência pelos modos curto-circuito, goticular e pulsado foi maior do que nas realizadas com os mesmos processos e modos de transferência, porém de forma automática, com exceção da variabilidade da convexidade da solda realizada com o processo arame tubular e transferência goticular.
- 13) Os resultados deste estudo mostraram ainda que a variabilidade da geometria e da diluição dos cordões de solda foi mais significativa no modo semiautomático do que no automático, ou seja, mostraram a que influência do soldador na variabilidade foi maior do que a influência do processo. E esta maior influência do soldador deve-se mais a variação na velocidade de soldagem do que a variação da distância bico de contato peça como mostram os resultados apresentados na Tabela 5. 42 e na Tabela 5. 43.

7- PROPOSTAS PARA TRABALHOS FUTUROS

Por este trabalho foi possível verificar como parâmetros pré-estabelecidos de soldas realizadas de modo automático e semiautomático com os processos MIG/MAG e arame tubular em corrente constante e pulsada afetam a variabilidade destas soldas em aspectos tais como a geometria do cordão e diluição. Porém, há ainda muitos tópicos que necessitam ser aprofundados por pesquisas posteriores, dos quais podem ser citados:

- a) Estudar a variabilidade da geometria e da diluição de soldas realizadas de forma automática e semiautomática com a mesma taxa de deposição e transferência metálica pelos modos curto-circuito, goticular e pulsado.
- b) Estudar a variabilidade da geometria e da diluição de soldas realizadas de forma automática e semiautomática ao utilizar outros metais de base, outros tipos de arames maciços e arames tubulares, bem como outros tipos de gás de proteção.
- c) Estudar a variabilidade dos ciclos térmicos impostos aos cordões de solda.
- d) Estudar quais os fatores que provocam maior aumento da variabilidade.

8- BIBLIOGRAFIA

- ALBERTAZZI, A., & SOUSA, A. R. (2008). *Fundamentos de metrologia Científica e industrial*. Barueri-SP: Manole Ltda.
- ALLUM, C. J. (June de 1983). Mig welding - Time for reassessment. *Metal Construction*, 15(6), 347-355.
- AMIN, M. (1981). Synergic Pulse Mig Welding. *Metal Construction*, 13(6), 349-353.
- AMIN, M. (May de 1983 b). Pulse Current Parameters for Arc Stability and Controlled Metal Transfer in Arc Welding. *Metal Construction*, vol.5, pp. p.272-278.
- AWS. (1991). *Welding Handbook: Welding Processes* (Vols. 2, Part 2. Miami). AMERICAN WELDING SOCIETY: eighth edition.
- AWS. (2001). *Welding Handbook: Welding Science & Technology* (Vols. 1, Miami). AMERICAN WELDING SOCIETY: nine edition.
- BAIXO, C. E., & DUTRA, J. C. (Jan/Mar de 1990). "O Estudo da Transferência Metálica no Processo de Soldagem MIG/MAG". *Revista Soldagem e Materiais*(21), 32-36.
- COSTA, M. C., STARLING, C. M., & MODENESI, P. J. (Jul/Set de 2008). Caracterização de Fenômenos de Instabilidade do Arco na Soldagem GMAW com Gases de Baixo Potencial de Oxidação. *Soldagem & Inspeção*, 13(3), 181-189.
- DEN OUDEN, G., & HERMANS, M. (Apr de 1999). Process Behavior and Stability in Short Circuit Gas Metal Arc Welding. *Welding Journal*, 78(4), 137-141.
- DUTRA, J. C. (1989). *Procedimento Computadorizado de Determinação, Seleção e Controle de Variáveis na soldagem MIG/MAG*. TESE (Doutorado em Engenharia Mecânica): Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis.

- ESSERS, W. G., & VAN GOMPEL, R. M. (June de 1984). Arc control with pulsed GMAW welding. *Welding Journal*, 63(6), 26-32.
- FARIAS, J. P., LUZ, T. d., & RODRIGUES, C. A. (2002). Estudo da Operacionalidade do Arame Tubular AWS E71T-1. *CONAMET/SAM. SIMPOSIO: MATERIA*.
- FBTS (Ed.). (2010). *Apostila de Inspetor de soldagem N1*. Rio de Janeiro: Fundação Brasileira de Soldagem.
- FERREE, S. E. (December de 1995). New Generation of Cored Wires Creates Less Fume and Spatter. *Welding Journal*, 74(12), 45-49.
- FRENCH, I. E., & BOSWORTH, M. R. (JUNE de 1995). A Comparison of Pulsed and Convencional Welding with Basic Flux Cored and Metal Cored Welding Wires. *Welding Journal*, 74(6), 197s-205s.
- GARCIA, R. P., & SCOTTI, A. (Abr/Jun de 2011). Uma metodologia para Análises Comparativas da Capacidade Produtiva entre Arames Maciços (MIG/MAG) e Tubulares (Eletrodo Tubular). *Soldagem @ Inspeção*, 16(2), 146-155.
- GOMES, E. B. (2006). *Análise do Comportamento da soldagem por Curto-Circuito aplicado ao Processo Eletrodo Tubular através da Metodologia Taguchi*. Dissertação (Mestrado em Engenharia Mecânica): Universidade Federal de Itajubá.
- GOMES, J. H., COSTA, S. C., PAIVA, A. P., & BALESTRASSI, P. P. (Jul/Set de 2011). Otimização de Múltiplos Objetivos na soldagem de Revestimento de Chapas de Aço Carbono ABNT 1020 Utilizando Arame Tubular Inoxidável Austenítico. *Soldagem & Inspeção*, 16(3), 232-242.
- GRAIG, E. (September de 1987). A unique mode of GMAW transfer. *Welding Journal*, 66(9), 51-56.

- HEALD, et al. (Feb de 1994). Mapping the Droplet Transfer Modes for an ER 100S-1 GMAW Electrode. *Welding Journal*, 73(2), 38s-44s.
- JÖNSSON, P. G., MURPHY, A. B., & SZEKELY, J. (Feb. de 1995). Oxygen Additions on Argon-Shielded Gas Metal Arc Welding. *Welding Journal*, 74(2), 48s-58s.
- KANG, M. J., & RHEE, S. (Jan de 2001). The Statistical Models for Estimating the Amount of Spatter in the Short Circuit Transfer Mode of GMAW. *Welding Journal*, 80(1), 1s-8s.
- KIM, Y. S., & EAGAR, T. W. (July de 1993). Analysis of Metal Transfer in Gas Metal Arc Welding. *Welding Journal*, 74(7).
- KOBAYASHI, Y., ANASTÁCIO, A. S., & NARDINE, C. (2005). Estudo da Influência da variação da Corrente de Curto-Circuito, Através da Indutância, sobre as Características Geométricas e Rendimento Real de Deposição. *Anais do 3º COBEF - Congresso Brasileiro de Fabricação*.
- LESNEWICH, A. (August de 1958). Control of Melting Rate and Metal Transfer in Gas-Shielded Metal-Arc. Welding Part I - Control of Electrode Melting Rate. *Welding Journal*, 08, 343s-353s.
- LIMA, A. C., & FERRARESI, V. A. (Jul/Set de 2006). Estudo dos modos de Transferência Metálica de um Arame Tubular Autoprottegido com Variação na Distância Bico de Contato-Peça. *Soldagem & Inspeção*, 11(3), 164-172.
- LOPERA, et al. (11 a 15 de Abril de 2011). Uso da técnica de perfilografia para visualização dos modos de transferência metálica no processo de soldagem GMAW usando uma câmera de alta velocidade. *6º Congresso Brasileiro de Engenharia de Fabricação*.
- LUZ, T. d., FARIAS, J. P., & FERRARESI, V. A. (Out/Dez de 2005). Influência do Teor de Oxigênio do Gás de Proteção no Mapa de

Transferência Metálica do Arame Tubular. *Soldagem & Inspeção*, 10(4), 198-203.

LYTTLE, k. A., & STAPON, W. G. (nov de 1990). Select the Best Shielding Gas Blend for the Application. *Welding Journal*, 69(11), 21-27.

MARQUES, P. V., MODENESI, P. J., & BRACARENCE, A. Q. (2007). *Soldagem Fundamentos e Tecnologia*. BELO HORIZONTE: EDITORA UFMG.

MIRANDA, H. C. (1999). *Influência da Indutância na Soldagem MIG/MAG na Posição sobre cabeça*. Dissertação (Mestrado em Engenharia Mecânica): Universidade Federal de Uberlândia.

MITA, T., SAKABE, A., & YOKOO, T. (1988). Quantitative estimatives of Arc Stability for CO₂ Gas Shielded Arc Welding. *Welding Internacional.*, 2(2), 152-159.

MODENESI, P. J. (fevereiro de 2008). *Introdução à Física do Arco Elétrico e sua Aplicação na soldagem dos Metais*. Belo Horizonte: fevereiro.

MONTGOMERY, D. C. (2004). *Introdução ao controle estatístico da qualidade*. Rio de Janeiro: LTC - Livros Técnicos e Científicos Editora S.A.

MOTTA, M. F. (2002). *Aplicação do Processo MIG/MAG Pulsado com Duplo Arame e Potenciais Isolados em Soldagens de Revestimento*. Tese (Doutorado em Engenharia Mecânica): Universidade Federal de Santa Catarina.

MOYER, N. (set de 2001). THE EVOLUTION OF SHIELDING GAS. *Welding Journal*, 81(9).

NIXON, J. H., & NORRISH, J. (April de 1988). Determination of Pulsed MIG Process Parameters. *Special Supplement from Welding & Metal Fabrication*, 4-7.

- OLIVEIRA, L. M., & COSTA, S. C. (2007). Uma investigação dos parâmetros de pulso em soldagem com arame tubular. *Rev. Ciências exatas*, 13(1), 105-111.
- ONSOIEN, M. I., LIU, S., & OLSON, D. L. (July de 1996). Shielding Gas Oxygen Equivalent in Weld Metal Microstructure Optimization. *Welding Journal*, 75(7), 216-224.
- PAIVA, et al. (Jan/Mar de 2010). Otimização do Processo de Soldagem FCAW Usando o Erro Quadrático Multivariado. *soldagem & Inspeção*, 15(1), 31-40.
- QUITES, A. M. (2002). *Introdução a soldagem a arco voltaico*. Florianópolis: Soldasoft.
- RODRIGUES, L. d., PAIVA, A. P., & COSTA, S. C. (Abr/Jun de 2007). Otimização do Processo de Soldagem com Eletrodo Tubular através da Análise da Geometria do Cordão de Solda. *Soldagem & Inspeção*, 13(2), 118-127.
- SANTOS, A. P. (2012). *SOLDAGEM EM OPERAÇÃO DE TUBOS API DE ALTA RESISTÊNCIA E BAIXA ESPESSURA COM ÊNFASE NA PERFURAÇÃO E TRINCAS A FRIO*. (U. F. Catarina, Ed.) Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis: Tese(Doutorado em Engenharia Mecânica).
- SCOTTI, A., & PONOMAREV, V. (2008). *SOLDAGEM MIG/MAG Melhor entendimento Melhor desempenho*. São Paulo: Artliber Editora Ltda.
- SILVA, H. R., & FERRARESI, V. A. (Março de 2003). Influência dos Parâmetros de Soldagem MIG de Alumínio na Qualidade do Cordão de Solda. *Soldagem & Inspeção*, 8(1).
- SILVA, R. H., DUTRA, J. C., & GOHR Jr, R. (2007). Fundamentos Científicos e Tecnológicos para Desenvolvimento do ProcessoMIG/MAG porCurto-Circuito Controlado(CCC)-Uma Revisão da Literatura Parte2de3:Formação da Gota

Metálica, Gases de Proteção, Mecanismos de Penetração, Aporte Térmico e Aspectos Econômicos.

- SILVA, R. H., Dutra, J. C., & GOHR Jr, R. (Jan/Mar de 2008). Fundamentos Científicos e Tecnológicos para o Desenvolvimento do Processo MIG/MAG por Curto-Circuito Controlado (CCC) - Uma Revisão da Literatura. Parte 3 de 3: Princípios dos Sistemas MIG/MAG em Curto-Circuito com Controle de Corrente. *Soldagem e Inspeção*, 13(1), 070-081.
- SODERSTROM, E. J., & MENDEZ, P. F. (May de 2008). Metal Transfer during GMAW with Thin Electrodes and Ar-CO₂ Shielding Gas Mixtures. *Welding Journal*, 87(5), 124s-130s.
- STARLING, C. M., & MODENESI, P. J. (2004). Avaliação da Velocidade de Fusão de Arames Tubulares. *Soldagem & Inspeção*, 9(1), 31-37.
- STARLING, C. M., & MODENESI, P. J. (Jan/Mar de 2005). Avaliação da Velocidade de Fusão do Arame na soldagem FCAW com Eletrodo Negativo. *Soldagem & Inspeção*, 10(1), 31-37.
- STARLING, C. M., & MODENESI, P. J. (Jul/Set de 2005). Efeito da Polaridade do Eletrodo na Velocidade de Fusão de Arames Tubulares. *Soldagem & Inspeção*, 10(3), 101-108.
- STARLING, C. M., & MODENESI, P. J. (Jul/Set de 2007). Proposição de Modelo para a Fusão de Arames Tubulares. *Soldagem & Inspeção*, 12(3), 168-178.
- STARLING, C. M., & MODENESI, P. J. (Jan/Mar de 2009). Comparação do Desempenho Operacional e das Características do Cordão na Soldagem com Diferentes Arames Tubulares. *Soldagem & Inspeção*, 14(1), 10-25.
- STENBACK, N. (Nov de 1990). "The influence of shilding gas on cored wires". *Welding Journal*.
- STENBAKCA, N., & PERSSON, K. (nov. de 1989). Shielding gases for Gas Metal Arc Welding. *Welding Journal*, 8(11), 41-47.

- SUBAN, M., & TUSEK, J. (2001). Dependence of melting rate in MIG/MAG welding onde type of shielding gas used. *Journal of Materials Processing Technology*, 185-192.
- SVENSSON, L. (1994). *Control of Microstructures and Properties in Steel Arc welds*. CRC: Press.
- VAIDYA, V. (set de 2002). Shielding gas mixtures for semiautomatic welds. *Welding Journal*, 81(9), pp. 43-48.
- VILARINHO, L. O. (2000). *Desenvolvimento e Avaliação de um Algoritmo Alternativo para a Soldagem MIG Sinérgica de Alumínio*. Dissertação (Mestrado em Engenharia Mecânica): Universidade Federal de Uberlândia.
- WAINER, E., BRANDI, S. D., & HOMEM DE MELLO, F. D. (1992). *Soldagem: Processos e Metalurgia*. São Paulo: Edgard Blücher.
- ZEEMANN, A., LIMA, A. A., & EMYGDIO, P. R. (1992). Influência do aporte de calor na microestrutura da zona termicamente afetada do aço inoxidável do tipo HK40. *Soldagem & Materiais*, 4(3), 40-46.
- ZEEMANN, et al. (s.d.). A soldagem GMAW (ou MIG / MAG). *Revista da Soldagem*, 4(17).

9- APÊNDICES

9.1- APÊNDICE A - Cálculo dos valores das variáveis de transferência com corrente pulsada para o processo MIG/MAG.

MODO PULSADO - O PROCESSO MIG/MAG							
1) $I_p = 280$ e 350 A Valores Arbitrados: (acima da corrente de transição)							
2) $t_p = D / I_p^2$ Valores Arbitrados:				4) $T = 40 \cdot dg^3 / va \cdot de^2$			
D = 500 n=2 (conforme bibliografia consultada)				Diâmetro da gota = 1,44 mm 20% maior que o do eletrodo			
D	I_p	t_p	t_p (adotado)	dg^3	Va	de^2	T
500	280	6,4	6,5 ms	1,44	3,0	1,2	28 ms
500	350	4,1	4,0 ms	1,44	4,0	1,2	21 ms
				1,44	5,0	1,2	17 ms
3) $V_a = K \cdot I_m$ $K = 0,027$				5) $t_b = T - t_p$			
(valor encontrado experimentalmente para arame de diâmetro 1,2 mm)				T			
k	I_m	Va	Va (adotada)	T_p	t_b	t_p	t_b
0,027	100	2,7	3,0 m/min	28	6,5	4,0	24,0
0,027	140	3,8	4,0 m/min	21	6,5	4,0	17,0
0,027	180	4,9	5,0 m/min	17	6,5	4,0	13,0
6) $I_b = (I_m \cdot T - I_p \cdot t_p) / t_b$							
I_b	I_m	T	I_p	t_p	t_b		
46	100	28	280	6,5	21,5		
77	140	21	280	6,5	14,5		
118	180	17	280	6,5	10,5		
I_b	I_m	T	I_p	t_p	t_b		
58	100	28	350	4,0	24,0		
91	140	21	350	4,0	17,0		
128	180	17	350	4,0	13,0		

9.2- APÊNDICE B - Cálculo dos valores das variáveis de transferência com corrente pulsada para o processo arame tubular.

MODO PULSADO - ARAME TUBULAR																																																	
1) $I_p = 280$ e 350 A Valores Arbitrados: (acima da corrente de transição)																																																	
<p>2) $tp = D / I_p^2$ Valores Arbitrados:</p> <p>D = 500 n = 2 (conforme bibliografia consultada)</p> <table border="1" style="width: 100%; border-collapse: collapse; text-align: center;"> <thead> <tr> <th>D</th> <th>I_p</th> <th>tp</th> <th>tp (adotado)</th> </tr> </thead> <tbody> <tr> <td>500</td> <td>280</td> <td>6,4</td> <td>6,5 ms</td> </tr> <tr> <td>500</td> <td>350</td> <td>4,1</td> <td>4,0 ms</td> </tr> </tbody> </table>	D	I_p	tp	tp (adotado)	500	280	6,4	6,5 ms	500	350	4,1	4,0 ms	<p>4) $T = 40.dg^3 / va.de^2$</p> <p>Diâmetro da gota = 1,44 mm 20% maior que o do eletrodo</p> <table border="1" style="width: 100%; border-collapse: collapse; text-align: center;"> <thead> <tr> <th>dg^3</th> <th>Va</th> <th>de^2</th> <th>T</th> </tr> </thead> <tbody> <tr> <td>1,44</td> <td>3,5</td> <td>1,2</td> <td>24 ms</td> </tr> <tr> <td>1,44</td> <td>5,0</td> <td>1,2</td> <td>17 ms</td> </tr> <tr> <td>1,44</td> <td>6,5</td> <td>1,2</td> <td>13 ms</td> </tr> </tbody> </table>	dg^3	Va	de^2	T	1,44	3,5	1,2	24 ms	1,44	5,0	1,2	17 ms	1,44	6,5	1,2	13 ms																				
D	I_p	tp	tp (adotado)																																														
500	280	6,4	6,5 ms																																														
500	350	4,1	4,0 ms																																														
dg^3	Va	de^2	T																																														
1,44	3,5	1,2	24 ms																																														
1,44	5,0	1,2	17 ms																																														
1,44	6,5	1,2	13 ms																																														
<p>3) $Va = K.Im$ $K = 0,035$</p> <p>(valor encontrado experimentalmente para arame de diâmetro 1,2 mm)</p> <table border="1" style="width: 100%; border-collapse: collapse; text-align: center;"> <thead> <tr> <th>k</th> <th>I_m</th> <th>Va</th> <th>Va (adotada)</th> </tr> </thead> <tbody> <tr> <td>0,035</td> <td>100</td> <td>3,5</td> <td>3,5 m/min</td> </tr> <tr> <td>0,035</td> <td>140</td> <td>4,9</td> <td>5,0 m/min</td> </tr> <tr> <td>0,035</td> <td>180</td> <td>6,3</td> <td>6,5 m/min</td> </tr> </tbody> </table>	k	I_m	Va	Va (adotada)	0,035	100	3,5	3,5 m/min	0,035	140	4,9	5,0 m/min	0,035	180	6,3	6,5 m/min	<p>5) $tb = T - tp$</p> <table border="1" style="width: 100%; border-collapse: collapse; text-align: center;"> <thead> <tr> <th>T</th> <th>tp</th> <th>tb</th> <th>tp</th> <th>tb</th> </tr> </thead> <tbody> <tr> <td>24</td> <td>6,5</td> <td>17,5</td> <td>4,0</td> <td>20,0</td> </tr> <tr> <td>17</td> <td>6,5</td> <td>10,5</td> <td>4,0</td> <td>13,0</td> </tr> <tr> <td>13</td> <td>6,5</td> <td>6,5</td> <td>4,0</td> <td>9,0</td> </tr> </tbody> </table>	T	tp	tb	tp	tb	24	6,5	17,5	4,0	20,0	17	6,5	10,5	4,0	13,0	13	6,5	6,5	4,0	9,0												
k	I_m	Va	Va (adotada)																																														
0,035	100	3,5	3,5 m/min																																														
0,035	140	4,9	5,0 m/min																																														
0,035	180	6,3	6,5 m/min																																														
T	tp	tb	tp	tb																																													
24	6,5	17,5	4,0	20,0																																													
17	6,5	10,5	4,0	13,0																																													
13	6,5	6,5	4,0	9,0																																													
<p>6) $I_b = (I_m.T - I_p.tp) / tb$</p> <table border="1" style="width: 100%; border-collapse: collapse; text-align: center;"> <thead> <tr> <th>I_b</th> <th>I_m</th> <th>T</th> <th>I_p</th> <th>tp</th> <th>tb</th> </tr> </thead> <tbody> <tr> <td>33</td> <td>100</td> <td>24</td> <td>280</td> <td>6,5</td> <td>17,5</td> </tr> <tr> <td>53</td> <td>140</td> <td>17</td> <td>280</td> <td>6,5</td> <td>10,5</td> </tr> <tr> <td>80</td> <td>180</td> <td>13</td> <td>280</td> <td>6,5</td> <td>6,5</td> </tr> </tbody> </table>	I_b	I_m	T	I_p	tp	tb	33	100	24	280	6,5	17,5	53	140	17	280	6,5	10,5	80	180	13	280	6,5	6,5	<table border="1" style="width: 100%; border-collapse: collapse; text-align: center;"> <thead> <tr> <th>I_b</th> <th>I_m</th> <th>T</th> <th>I_p</th> <th>tp</th> <th>tb</th> </tr> </thead> <tbody> <tr> <td>50</td> <td>100</td> <td>24</td> <td>350</td> <td>4,0</td> <td>20,0</td> </tr> <tr> <td>75</td> <td>140</td> <td>17</td> <td>350</td> <td>4,0</td> <td>13,0</td> </tr> <tr> <td>104</td> <td>180</td> <td>13</td> <td>350</td> <td>4,0</td> <td>9,0</td> </tr> </tbody> </table>	I_b	I_m	T	I_p	tp	tb	50	100	24	350	4,0	20,0	75	140	17	350	4,0	13,0	104	180	13	350	4,0	9,0
I_b	I_m	T	I_p	tp	tb																																												
33	100	24	280	6,5	17,5																																												
53	140	17	280	6,5	10,5																																												
80	180	13	280	6,5	6,5																																												
I_b	I_m	T	I_p	tp	tb																																												
50	100	24	350	4,0	20,0																																												
75	140	17	350	4,0	13,0																																												
104	180	13	350	4,0	9,0																																												

9.3- APÊNDICE C - Frequências de transferências metálicas.

Frequências de transferências metálicas com $V_a = 2,4$ m/min.

Uaj	Vs = 15		Vs = 25		Vs = 30	
	Im	Freq	Im	Freq	Im	Freq
12	129,5	25,4	127,4	19,8	128,6	17,9
13	127,0	28,4	119,3	21,4	119,9	22,4
14	111,3	30,1	116,1	32,8	114,3	28,9
15	107,5	34,6	113,2	37,2	102,3	29,4
16	100,3	41,9	98,1	54,0	96,5	33,8
17	102,7	36,1	102,2	39,6	98,3	33,6
18	104,5	28,1	105,2	30,6	99,1	28,3
19	105,0	22,0	104,7	24,9	100,1	20,5
20	102,1	10,9	103,8	11,0	100,7	10,5
21	102,6	11,7	105,2	10,9	101,3	9,6
22	105,8	10,2	103,7	10,5	100,9	2,3
23	106,6	9,3	104,1	3,8	104,8	2,2
24	103,9	2,2	108,8	2,2	107,6	2,0
25	107,2	1,3	108,7	2,3	110,1	2,0
26	110,1	1,5	111,0	2,0	115,0	1,5
27	114,2	1,4	113,8	1,6	117,4	1,0
28	117,1	1,4	127,9	1,4	120,4	1,2
29	121,6	1,0	132,4	0,9	125,4	0,8
30	137,4	0,5	140,7	0,5	128,1	0,5

Uaj = tensão ajustada (V); Vs = velocidade de soldagem(cm/min);

Im = corrente média(A); Freq = Frequência (gotas/min)

Frequências de transferências metálicas com $V_a = 3,2$ m/min.

Uaj	Vs = 15		Vs = 25		Vs = 30	
	Im	Freq	Im	Freq	Im	Freq
12	163,9	35,2	162,8	19,5	154,8	16,6
13	171,8	38,8	150,8	21,8	159,7	25,2
14	158,5	46,4	143,5	33,6	148,8	24,6
15	147,0	47,8	135,4	44,6	145,9	31,2
16	140,4	50,0	126,8	53,1	134,9	39,8
17	132,2	52,3	130,5	65,6	121,9	48,3
18	142,7	45,5	133,4	55,6	123,9	39,5
19	143,3	35,5	137,4	44,1	125,6	31,7
20	145,3	29,6	140,2	35,7	127,8	25,2
21	146,0	28,5	141,1	28,2	128,6	20,8
22	136,1	17,3	135,9	20,3	133,7	19,0
23	136,4	10,8	135,9	13,0	130,9	9,5
24	135,4	8,8	135,1	8,2	135,9	7,3
25	140,2	8,3	141,9	7,3	138,8	6,5
26	144,1	7,3	145,4	6,0	142,5	6,0
27	150,9	4,0	146,6	4,2	148,2	6,0
28	153,8	3,6	153,4	2,2	152,5	3,8
29	155,0	4,5	152,7	2,5	154,2	2,5
30	152,2	4,5	149,2	2,5	150,7	1,3

Uaj = tensão ajustada (V); Vs = velocidade de soldagem(cm/min);

Im = corrente média(A); Freq = Frequência (gotas/min)

Frequências de transferências metálicas com $V_a = 4,3$ m/min.

Uaj	Vs =15		Vs = 25		Vs = 30	
	Im	Freq	Im	Freq	Im	Freq
12	202,0	19,4	208,8	18,8	186,8	13,2
13	190,1	18,4	206,5	25,4	182,0	12,0
14	202,5	35,2	208,2	38,0	198,7	18,2
15	182,0	36,0	181,1	47,6	193,7	28,0
16	178,0	35,5	169,4	64,7	171,3	39,8
17	175,4	37,6	165,7	83,4	169,3	39,5
18	170,0	40,2	162,4	94,0	159,3	48,3
19	180,5	36,6	164,0	74,8	167,2	31,7
20	181,7	30,6	172,7	68,2	168,9	25,2
21	174,3	27,6	173,5	56,6	175,4	24,9
22	178,3	25,3	171,1	48,8	183,6	32,0
23	176,5	22,9	171,7	45,8	182,0	22,6
24	179,1	23,9	172,9	35,5	184,2	19,0
25	179,0	16,3	175,1	27,5	184,5	13,7
26	180,1	14,3	176,0	19,7	181,9	13,0
27	185,2	11,8	178,4	13,7	191,9	13,6
28	194,3	12,0	182,9	13,3	195,1	12,0
29	194,9	10,5	190,6	12,5	199,4	12,8
30	199,1	10,5	195,1	4,0	201,0	11,0

Uaj = tensão ajustada (V); Vs = velocidade de soldagem(cm/min);
 Im = corrente média(A); Freq = Frequência (gotas/min)