

CARLOS EDUARDO AGUIAR LIMA RODRIGUES

AVALIAÇÃO CINEMÁTICA E DINÂMICA DA
TRANSFERÊNCIA METÁLICA NA SOLDAGEM
MIG/MAG



UNIVERSIDADE FEDERAL DE UBERLÂNDIA
FACULDADE DE ENGENHARIA MECANICA
2007

CARLOS EDUARDO AGUIAR LIMA RODRIGUES

**AVALIAÇÃO CINEMÁTICA E DINÂMICA DA TRANSFERÊNCIA
METÁLICA NA SOLDAGEM MIG/MAG**

Tese apresentada ao Programa de Pós-graduação em Engenharia Mecânica da Universidade Federal de Uberlândia, como parte dos requisitos para obtenção do título de **DOUTOR EM ENGENHARIA MECÂNICA**.

Área de concentração: Materiais e Processos de Fabricação.

Orientador: Prof. Dr. Américo Scotti.

**UBERLANDIA-MG
2007**

FICHA CATALOGRÁFICA

Dados Internacionais de Catalogação na Publicação (CIP)

R696a Rodrigues, Carlos Eduardo Aguiar Lima, 1977-
Avaliação cinemática e dinâmica da transferência metálica na
soldagem mig/mag / Carlos Eduardo Aguiar Lima Rodrigues.- 2007.
264 f. : il.

Orientador: Américo Scotti.

Tese (doutorado) – Universidade Federal de Uberlândia, Programa de
de Pós-Graduação em Engenharia Mecânica.
Inclui bibliografia.

1. Soldagem - Teses. 2. Alumínio - Soldagem - Teses. I. Scotti, Amé-
rico. II. Universidade Federal de Uberlândia. Programa de Pós-Graduação
em Engenharia Mecânica. IV. Título.

CDU: 621.791

CARLOS EDUARDO AGUIAR LIMA RODRIGUES

AVALIAÇÃO CINEMÁTICA E DINÂMICA DA TRANSFERÊNCIA METÁLICA NA
SOLDAGEM MIG/MAG.

Tese **APROVADA** pelo Programa de Pós-
graduação em Engenharia Mecânica da
Universidade Federal de Uberlândia.

Área de concentração: Materiais e Processos de
Fabricação.

Banca Examinadora:

Prof. Dr. Américo Scotti – UFU – Orientador

Prof. Dr. Cícero Murta Diniz Starling – UFMG – Membro

Prof. Dr. Sérgio Rodrigues Barra – SENAI – Membro

Prof. Dr. Louriel Oliveira Vilarinho – UFU – Membro

Prof. Dr. Valtair Antonio Ferraresi – UFU – Membro

Uberlândia, 19 de outubro de 2007.

Dedicada à inspiradora memória de Juracy Domingos Lima, minha avó.

AGRADECIMENTOS

A Deus.

Aos meus pais, por todas as lições, por seu exemplo e pelo apoio especial nas horas difíceis.

À minha esposa e meu filho pelo incentivo e apoio em todos os momentos.

Aos meus irmãos, padrinhos, tios e primos pelo incentivo e apoio nos momentos difíceis.

Ao CNPq pelo suporte financeiro.

À FEMEC/UFU pela oportunidade de realizar o curso.

Ao Prof. Scotti pelos ensinamentos, a orientação, a paciência, as discussões, por sua grande colaboração e atenção, e por sua amizade.

Aos membros da banca pela sua generosa contribuição para este trabalho.

Ao Prof. Jesualdo pelos ensinamentos, pelo incentivo à realização deste curso e por sua amizade.

Ao Prof. Modenesi e ao Prof. Valtair por sua contribuição na discussão dos resultados.

Aos meus outros professores pelos ensinamentos.

Aos amigos Temico, Alessandra, Alexandre, Venceslau, Ilvan e Peter pela sua amizade fraterna, sua ajuda técnica, e pelos momentos de descontração.

Aos Professores do Laprosolda Valtair e Louriel pelos ensinamentos, ajuda técnica e por sua amizade.

Ao Coordenador Márcio Bacci e ao Colegiado do Programa de Pós-graduação por atender aos meus pedidos de prorrogação de prazo.

Aos engenheiros Glaumo e Leonardo, e aos inspetores Daybson, Neto e Alexandre pelo incentivo, compreensão e por absorverem meus compromissos e minhas responsabilidades na Petrobras enquanto me ausentei para trabalhar na tese em Mossoró, Fortaleza e Uberlândia.

Aos colegas do Laprosolda Diandro, Clayton, Vinícius, Celina, Tereza, André Richett, André Luiz, João, José, Lazinho, Ruhan, Admilson, entre outros, pela colaboração no dia-a-dia.

Aos bolsistas Pedro, Marcos Vinícius, Oreste, Nike, Rangel, Marden, Diego, Fernanda, Tiago, André, Douglas e muitos outros pela colaboração no dia-a-dia.

Aos amigos do Engesolda/UFC Cleiton, Willys, Hélio, Marcelo e Rodrigo pelo incentivo.

Aos demais colegas pelas horas de descontração.

RODRIGUES, C. E. A. L. **Avaliação Cinemática e Dinâmica da Transferência Metálica na Soldagem MIG/MAG**. 2007. 150 f. Tese de Doutorado, Universidade Federal de Uberlândia, Uberlândia.

Resumo

Com o intuito de aprofundar o conhecimento da transferência metálica em MIG/MAG goticular e fornecer dados para aprimorar a elaboração de modelos da mesma, foram realizados experimentos com eletrodos de aço (polaridade inversa, gás de proteção Ar+5%O₂) e alumínio (polaridade inversa, gás de proteção Ar), experimentos com eletrodo de aço e vários gases de proteção (polaridade inversa, gases de proteção Ar+5%O₂+de 0 a 25%He), e experimentos com eletrodo de aço em polaridade direta (gás de proteção Ar+5%O₂). As soldas, em posição plana, foram filmadas em alta velocidade através da técnica da perfilografia. Determinou-se experimentalmente características da transferência metálica (diâmetro das gotas e sua frequência de destacamento e o comprimento do arco elétrico), bem como as características cinemáticas e dinâmicas das transferências metálicas obtidas nesses experimentos (velocidade de chegada das gotas à poça de fusão; aceleração média das gotas durante a trajetória; quantidade de movimento efetiva das gotas) e a geometria dos cordões de solda, comparados sempre que possível a resultados experimentais e numéricos disponíveis na literatura. Os resultados mostraram que a corrente e o comprimento do arco influenciam as características cinemáticas e dinâmicas das gotas em todas as condições estudadas, que o gás de proteção não exerce influência significativa nas características avaliadas, que a polaridade do eletrodo só afeta as características cinemáticas e dinâmicas no modo de transferência globular e que a quantidade de movimento efetiva das gotas influencia claramente a penetração do cordão de solda apenas quando associada à mudança no modo de transferência de globular para goticular. Adicionalmente, a corrente de soldagem afetou a penetração das soldas, mesmo utilizando-se aproximadamente o mesmo calor imposto, o comprimento do arco afetou a penetração das soldas de aço e alumínio e com diferentes gases de proteção, o gás de proteção não exerceu influência nos valores da penetração, mas alterou a forma do cordão e a polaridade não exerceu influência na penetração da solda, mas apenas na sua largura e reforço, sendo mais esbelto o cordão de solda em polaridade direta.

Palavras Chave: Soldagem MIG/MAG. Transferência Metálica. Alumínio. Gás de proteção. Polaridade.

RODRIGUES, C. E. A. L. **Dynamic and cinematic evaluation of MIG/MAG metal transfer.** 2007. 150 f. Ph.-D. Dissertation, Federal University of Uberlandia. Uberlandia.

Abstract

The goal of this work is to improve the knowledge of the metal transfer in MIG/MAG welding and supply data to improve the elaboration of its models. In this intention, experiments were accomplished with steel (inverse polarity; Ar+5%O₂ shield gas) and aluminum (inverse polarity, Ar shield gas) electrodes, with steel electrode and several shield gases (inverse polarity, Ar+5%O₂+ of 0 to 25%He shield gases) and experiments with steel electrode in direct polarity (Ar+5%O₂ shield gas). The flat position welds were filmed by a high-speed video camera using the shadowgraph technique. Kinematics and dynamics characteristics of metal transfers in those experiments were obtained experimentally (droplets arrival speed in the weld pool, in flight droplets average acceleration, effective quantity of movement), and the weld geometry, and compared whenever possible with experimental and numeric results available in literature. The results showed that the weld current influences the kinematics and dynamics characteristics of the drops in all of studied conditions, that the arc length influences the cinematic characteristics and dynamics in the welds with steel and aluminum electrodes, and in the steel welds with different shield gasses; that the shield gas doesn't exercise significant influence in the appraised characteristics, and that the current polarity only affects the cinematic characteristics and dynamics in globular transfer mode. Additionally, the welding current affects the weld penetration despite the use of approximately the same heat input, the arc length affect the steel and aluminum weld penetration and with different shield gasses, the shield gas didn't exercise influences in the values of the penetration but it altered the form of the weld and the current polarity didn't exercise influences the weld penetration, but just in width and reinforcement, being more slender the weld bead in direct polarity.

Key words: MIG/MAG welding. Metal Transfer. Aluminum. Shield Gas. Polarity.

Sumário

Capítulo 1	1
1. Introdução	1
1.1 Contextualização, motivação e objetivo	1
1.2 Descrição do conteúdo apresentado	3
Capítulo 2	5
2. Revisão Bibliográfica	5
2.1 Modelos referentes à soldagem MIG/MAG	6
2.2 Observação e mensuração de gotas em movimento	17
2.3 Considerações finais	25
Capítulo 3	26
3. Metodologia e Procedimento Experimental	26
3.1 Determinação dos parâmetros para soldar com diferentes comprimentos de arco e valores de corrente	27
3.2 Caracterização da transferência metálica	29
3.2.1. <i>Filmagem em alta velocidade das transferências metálicas</i>	30
3.2.2. <i>Medição das características cinemáticas das gotas em transferência</i>	33
3.3 Determinação da característica dinâmica das gotas em transferência	35
3.4 Medição das características geométricas das soldas	36
Capítulo 4	38
4. Avaliação do Sistema para Quantificar as Características Cinemáticas das Gotas	38
4.1 Metodologia de avaliação	39
4.2 Resultados	39
4.3 Conclusão	45
Capítulo 5	47
5. Avaliação cinemática e dinâmica da transferência metálica em MIG/MAG com arame-eletrodo de aço carbono	47
5.1 Planejamento Experimental	47
5.2 Caracterização geométrica da transferência metálica	50
5.3 Medição das características cinemáticas das gotas	52
5.3.1. <i>Avaliação da velocidade de chegada da gota à poça de fusão</i>	58
5.3.2. <i>Avaliação da aceleração média da gota durante a trajetória</i>	60
5.4 Caracterização Geométrica dos cordões de solda	63
5.5 Quantidade de Movimento Efetiva das gotas em transferência	68
5.6 Conclusões Parciais	72
5.6.1. <i>Relacionando-se os parâmetros de entrada (corrente e comprimento do arco) com as características cinemáticas:</i>	72
5.6.2. <i>Relacionando os parâmetros de entrada (corrente e comprimento do arco) com as características dinâmicas:</i>	73
5.6.3. <i>Relacionando os parâmetros de entrada (corrente e comprimento do arco) com as características geométricas dos cordões:</i>	73
5.6.4. <i>Relacionando as características dinâmicas e a geometria do cordão de solda:</i>	73
Capítulo 6	74
6. Avaliação cinemática e dinâmica da transferência metálica em MIG/MAG com arame-eletrodo de alumínio	74

6.1	Planejamento Experimental	74
6.2	Caracterização geométrica da transferência metálica	76
6.3	Medição das características cinemáticas das gotas	78
6.3.1.	<i>Avaliação da velocidade de chegada das gotas à poça de fusão.....</i>	<i>81</i>
6.3.2.	<i>A aceleração das gotas durante a trajetória.....</i>	<i>83</i>
6.4	Caracterização geométrica dos cordões de solda	85
6.5	Quantidade de Movimento Efetiva das gotas em transferência.....	90
6.6	Conclusões parciais	94
6.6.1.	<i>Relacionando os parâmetros de entrada (corrente e comprimento de arco) com as características cinemáticas:.....</i>	<i>94</i>
6.6.2.	<i>Relacionando os parâmetros de entrada (corrente e comprimento de arco) com as características dinâmicas:</i>	<i>94</i>
6.6.3.	<i>Relacionando os parâmetros de entrada (corrente e comprimento do arco) com a geometria da solda</i>	<i>94</i>
6.6.4.	<i>Relacionando as características dinâmicas e a geometria da solda.....</i>	<i>95</i>
Capítulo 7	96
7. Efeito do gás de proteção sobre as características cinemáticas e dinâmicas da transferência metálica.....	96
7.1	Planejamento Experimental	96
7.2	Caracterização geométrica da transferência metálica	98
7.3	Comportamento cinemático das gotas e sua velocidade de chegada à poça de fusão 102	
7.4	Caracterização geométrica dos cordões de solda	107
7.5	Quantidade de Movimento Efetiva das gotas em transferência.....	113
7.6	Conclusões Parciais.....	116
7.6.1.	<i>Relacionando os parâmetros de entrada (composição do gás de proteção e comprimento de arco) com as características cinemáticas:.....</i>	<i>116</i>
7.6.2.	<i>Relacionando os parâmetros de entrada (composição do gás de proteção e comprimento de arco) com as características dinâmicas:</i>	<i>116</i>
7.6.3.	<i>Relacionando os parâmetros de entrada (composição do gás de proteção e comprimento de arco) com a geometria da solda:</i>	<i>116</i>
7.6.4.	<i>Relacionando as características dinâmicas com a geometria da solda:.....</i>	<i>117</i>
Capítulo 8	118
8. Efeito da polaridade da corrente nas características cinemáticas e dinâmicas da transferência metálica de um eletrodo de aço carbono	118
8.1	Planejamento Experimental	120
8.2	Caracterização geométrica da transferência metálica	122
8.3	Medição das características cinemáticas das gotas	123
8.3.1.	<i>Avaliação da velocidade de chegada das gotas à poça de fusão.....</i>	<i>125</i>
8.3.2.	<i>Avaliação da aceleração das gotas durante a trajetória.....</i>	<i>127</i>
8.4	Caracterização geométrica dos cordões de solda	128
8.5	Quantidade de Movimento Efetiva das gotas em transferência.....	131
8.6	Conclusões parciais	133
8.6.1.	<i>Relacionando os fatores de entrada (corrente e polaridade) com as características cinemáticas:.....</i>	<i>133</i>
8.6.2.	<i>Relacionando os fatores de entrada (corrente e polaridade) com as características dinâmicas:.....</i>	<i>133</i>
8.6.3.	<i>Relacionando os fatores de entrada (corrente e polaridade) com a geometria da solda:.....</i>	<i>134</i>
8.6.4.	<i>Relacionando as características dinâmicas com a geometria da solda:.....</i>	<i>134</i>
Capítulo 9	135
9. Considerações Finais	135
Capítulo 10	139

10. Conclusões.....	139
10.1 Relacionando-se os parâmetros de entrada (corrente, comprimento do arco, material do eletrodo, composição do gás de proteção e polaridade) com as características cinemáticas:	139
10.2 Relacionando-se os parâmetros de entrada (corrente, comprimento do arco, material do eletrodo, composição do gás de proteção e polaridade) com as características dinâmicas: 139	
10.3 Relacionando-se os parâmetros de entrada (corrente, comprimento do arco, material do eletrodo, composição do gás de proteção e polaridade) com a geometria da solda:	139
10.4 Relacionando-se as características dinâmicas e a geometria dos cordões de solda:140	
Capítulo 11	142
11. Propostas para trabalhos futuros	142
Capítulo 12	143
12. Referências Bibliográficas.....	143
Anexos.....	150
13. Anexo I – Oscilogramas: Comportamento dinâmico da fonte de soldagem	151
13.1 Soldagens realizadas na Avaliação Cinemática da Transferência Metálica com aço-carbono	151
13.2 Soldagens realizadas na avaliação cinemática e dinâmica da transferência metálica com eletrodo de alumínio.....	155
13.3 Soldagens realizadas na avaliação do efeito do gás de proteção nas características cinemáticas e dinâmicas da transferência metálica com eletrodo de aço carbono	158
13.4 Soldagens em polaridade direta.....	164
14. Anexo II: Relatório Interno LAPROSOLDA/UFU/009/2005	166

Lista de Tabelas

Tabela 4.1 – Medidas do diâmetro das esferas utilizadas em função do diâmetro nominal crescente e da ampliação da imagem.....	41
Tabela 4.2 – Medidas da aceleração da gravidade em função de “falsas gotas” com diâmetro nominal crescente e da ampliação da imagem	42
Tabela 5.1 – Parâmetros de soldagem monitorados em função dos valores de regulação (AWS ER70S-6, Ø1,2 mm, gás de proteção Ar + 5%O ₂).....	48
Tabela 5.2 – Características geométricas das transferências metálicas.....	51
Tabela 5.3 – Relação entre a frequência esperada de destacamento e a frequência real	52
Tabela 5.4 – Velocidade de chegada: medidas, médias e resultado da ANOVA (V _{CHE} – l x comprimento do arco (análogo à DBCP)).....	58
Tabela 5.5 – Velocidade de chegada: medidas, médias e resultado da ANOVA (V _{CHE} – comprimento do arco (análogo à DBCP) x l).	59
Tabela 5.6 – Aceleração média: medidas, médias e resultado da ANOVA (A _{MED} – l x Comprimento do arco (DBCP)).	62
Tabela 5.7 – Aceleração média: medidas, médias e resultado da ANOVA (A _{MED} – DBCP x l)..	62
Tabela 5.8 – Geometria dos cordões de solda: medidas realizadas.....	64
Tabela 5.9 – Níveis de significância “p” obtidos pela ANOVA.....	66
Tabela 5.10 – Características da transferência e as características dinâmicas das gotas	69
Tabela 5.11 – Valores normalizados de l, a, Qe; valores preditos e observados de P.....	71
Tabela 6.1 – Planejamento experimental para soldagens com diferentes comprimentos de arco e níveis de corrente.....	75
Tabela 6.2 – Parâmetros de regulação para as soldagens e valores monitorados.	75
Tabela 6.3 – Filmagens realizadas dispostas em função da DBCP e da corrente de soldagem.	76
Tabela 6.4 – Características geométricas das transferências metálicas.....	77
Tabela 6.5 – Relação entre a frequência esperada de destacamento e a frequência real	78
Tabela 6.6 – Velocidade de chegada: medidas, médias e resultado da ANOVA (V _{CHE} – l x Comprimento de arco).....	82
Tabela 6.7 – Velocidade de chegada: medidas, médias e resultado da ANOVA (V _{CHE} – comprimento de arco x l).....	83
Tabela 6.8 – Aceleração média: medidas, médias e resultado da ANOVA (V _{CHE} – l x Comprimento do arco).....	84
Tabela 6.9 – Aceleração média: medidas, médias e resultado da ANOVA (V _{CHE} – Comprimento do arco x l).	84
Tabela 6.10 – Geometria dos cordões de solda: medidas realizadas.....	87
Tabela 6.11 – Geometrias obtidas dos cordões dispostas em função do comprimento do arco e da corrente de soldagem.....	87
Tabela 6.12 – Níveis de significância “p” obtidos pela ANOVA.....	87
Tabela 6.13 – Características das transferências e características dinâmicas das gotas.	91
Tabela 6.14 – Valores normalizados de l, a e Qe; valores preditos e observados de P.....	93
Tabela 7.1 – Combinação de DBCP com as composições de gás utilizadas.	96
Tabela 7.2 – Parâmetros de soldagem regulados e monitorados durante a avaliação do efeito do teor de He.....	97
Tabela 7.3 – Filmagens realizadas dispostas em função da DBCP e da composição do Gás de proteção utilizado.	99
Tabela 7.4 – Características geométricas das transferências metálicas para as diferentes composições do gás de proteção.....	99
Tabela 7.5 – Relação entre a frequência de destacamento esperada (f _{ESP}) e a observada (f).101	
Tabela 7.6 – Velocidade de chegada: medidas; médias e resultado da ANOVA.....	107
Tabela 7.7 – Geometria dos cordões de solda: medidas realizadas.....	109

Tabela 7.8 – Macrografias dos cordões de solda.....	109
Tabela 7.9 – Níveis de significância obtidos pela ANOVA.....	110
Tabela 7.10 – Características de transferência metálica e de dinâmica das gotas.....	114
Tabela 8.1 – Planejamento experimental.....	121
Tabela 8.2 – Parâmetros de regulação para as soldagens e valores monitorados.....	121
Tabela 8.3 – Filmagens realizadas.....	122
Tabela 8.4 – características geométricas das transferências metálicas.....	123
Tabela 8.5 – Relação entre a frequência esperada de destacamento e a frequência real.....	123
Tabela 8.6 – Velocidades de chegada: medidas, médias e resultado da ANOVA.....	126
Tabela 8.7 – Aceleração média: medidas, médias e resultado da ANOVA.....	127
Tabela 8.8 – Medidas das características geométricas dos cordões de solda.....	128
Tabela 8.9 – Geometrias obtidas dos cordões de solda (imagens em ampliações diferentes).	128
Tabela 8.10 – Níveis de significância “p” obtidos pela ANOVA.....	129
Tabela 8.11 – Características da transferência metálica e características dinâmicas das gotas.	132
Tabela 9.1 – Efeito dos parâmetros de entrada sobre as características cinemáticas.....	135
Tabela 9.2 – Efeito dos parâmetros de entrada sobre Q_e	136
Tabela 9.3 – Efeito dos parâmetros de entrada sobre a geometria das soldas.....	138
Tabela 9.4 – Efeito da característica dinâmica sobre a penetração das soldas.....	138

Lista de Figuras

Figura 2.1 – Efeito da consideração da convecção na poça no modelo de Kim & Na (1995).....	7
Figura 2.2 – Efeito da consideração de uma estimativa do momentum das gotas no modelo de Kim & Na (1995).....	7
Figura 2.3 – Seqüência de queda de uma gota e as distribuições de temperatura e velocidades do fluxo fluido obtidos por Wang & Tsai (2001).	8
Figura 2.4 – Dados experimentais e curvas levantadas por regressão utilizados no modelo de Kim et al. (2003).	9
Figura 2.5 – Verificação da acuidade do modelo de Kim et al. (2003) em diversas condições de soldagem. As isotermas apresentadas estão em K.	10
Figura 2.6 – Resultado experimental e simulado do modelo de Miyasaka et al (2006) para juntas de topo.	11
Figura 2.7 – Resultado experimental e simulado de Miyasaka et al (2006) para soldagem multipasse.	11
Figura 2.8 – Distribuição de temperatura durante a transferência metálica obtida por Hu & Tsai (2007a).	12
Figura 2.9 – Distribuição de corrente no arco durante a transferência metálica obtida por Hu & Tsai (2007a).	12
Figura 2.10 – Distribuição de velocidades do fluxo durante a transferência metálica obtida por Hu & Tsai (2007a)	13
Figura 2.11 – Distribuição de pressão no arco durante a transferência metálica obtida por Hu & Tsai (2007)	13
Figura 2.12 – Distribuição de temperatura no eletrodo, gota e poça durante a transferência metálica. Adaptado de Hu & Tsai (2007b).	14
Figura 2.13 – Velocidades do metal na gota e poça de fusão durante a transferência metálica. Adaptado de Hu & Tsai (2007b).	15
Figura 2.14 – Perfil simulado do cordão de solda de MIG/MAG em aço carbono obtido por Hu & Tsai (2007).	16
Figura 2.15 – Avaliação do modelo de Murray & Scotti (1999).	16
Figura 2.16 – Efeito da Corrente e do Gás de proteção sobre a freqüência de destacamento das gotas (Rhee & Kannatey-Asibu, 1992)	19
Figura 2.17 – Efeito da corrente e do comprimento energizado de eletrodo sobre a freqüência de destacamento das gotas (Rhee & Kannatey-Asibu, 1992).	20
Figura 2.18 – Curvas posição da gota em função do tempo (Rhee & Kannatey-Asibu, 1992). ..	20
Figura 2.19 – Comparação dos resultados de Hu & Tsai (2007b) com os de Jones et al (1998).	21
Figura 2.20 – Acelerações médias das gotas durante a trajetória apresentadas por Rhee & Kannatey-Asibu (1992).....	22
Figura 2.21 – Velocidade das gotas logo após o destacamento para os diâmetros de eletrodo 0,9 mm e 1,2 mm (Lin et al, 2001).	22
Figura 2.22 – Comparação entre os valores preditos e medidos da velocidade das gotas após o destacamento para os diâmetros de eletrodo 0,9 mm e 1,2 mm (Lin et al, 2001).	23
Figura 2.23 – Curvas ajustadas de trajetórias de gotas em transferência levantadas por Jones et al (1998c).	24
Figura 2.24 – Velocidades das gotas obtidas por Jones et al (1998c).	24
Figura 2.25 – Aceleração total das gotas durante a trajetória, e aceleração devida ao jato de plasma, obtidas por Jones et al (1998c).	25
Figura 3.1 – Representação esquemática da adequação dos parâmetros de soldagem.	28
Figura 3.2 – Técnica de filmagem Perfilografia. (Vilarinho, 2000).....	30
Figura 3.3 – Tela de apresentação do Vídeo Analisador da transferência metálica.	32
Figura 3.4 – Ambiente de análise do programa.	33

Figura 3.5 – Critérios para medição do comprimento do arco em soldagens com transferências metálicas por vôo livre. (adaptado de Maia, 2001).....	33
Figura 3.6 – Seqüência de localização de alvos nas imagens de transferência metálica, com a definição, na gota em transferência, de um alvo por quadro.	34
Figura 3.7 – Curva típica posição <i>versus</i> tempo de uma gota em transferência.....	34
Figura 3.8 – Características Geométricas do cordão de solda.....	37
Figura 4.1 – Esquema da bancada utilizada para avaliar os erros de medida das gotas	39
Figura 4.2 – Ilustração de imagens usadas para medição dos diâmetros das “falsas gotas”....	40
Figura 4.3 – Curvas posição x tempo obtidas com esferas de todos tamanhos em queda livre, medidas com ampliação média.	43
Figura 4.4 – Curvas posição x tempo obtidas com esferas de todos tamanhos em queda livre, medidas com ampliação maior.....	43
Figura 4.5 – Curvas obtidas para a “falsa gota” de 0,7 mm.	44
Figura 4.6 - Curvas obtidas para a “falsa gota” de 1,3 mm	44
Figura 4.7 - Curvas obtidas para a “falsa gota” de 1,9 mm	44
Figura 4.8 - Curvas obtidas para a “falsa gota” de 2,4 mm	45
Figura 4.9 - Curvas obtidas para a “falsa gota” de 3,2 mm	45
Figura 5.1 – Características estáticas dos arcos obtidos.	49
Figura 5.2 – Comparação das relações entre corrente e taxa de fusão obtidos (pontos cheios) e os dados de Modenesi & Reis (2005)	49
Figura 5.3 – Filmagens realizadas dispostas em função da DBCP e da corrente de soldagem.	51
Figura 5.4 – Curvas posição x tempo, teste A. I = 200 A; DBCP = 18 mm (a = 3,9 mm).....	53
Figura 5.5 – Curvas posição x tempo, teste B. I = 200 A; DBCP = 22 mm. (a = 9 mm).....	54
Figura 5.6 – Curvas posição x tempo, teste C. I = 200 A; DBCP = 26 mm. (a = 14,5 mm).....	54
Figura 5.7 – Curvas posição x tempo, teste D. I = 250 A; DBCP = 18 mm. (a = 3,7 mm).....	55
Figura 5.8 – Curvas posição x tempo, teste E. I = 250 A; DBCP = 22 mm. (a = 9,3 mm).....	55
Figura 5.9 – Curvas posição x tempo, teste F. I = 250 A; DBCP = 26 mm. (a = 13,2 mm)	56
Figura 5.10 – Curvas posição x tempo, teste G. I = 300 A; DBCP = 18 mm. (a = 4,7 mm)	56
Figura 5.11 – Curvas posição x tempo, teste H. I = 300 A; DBCP = 22 mm. (a = 9,5 mm).....	57
Figura 5.12 – Curvas posição x tempo, teste I. I = 300 A; DBCP = 26 mm. (a = 12,3 mm)	57
Figura 5.13 – Ilustração do efeito do parabolismo das curvas posição x tempo sobre a velocidade das gotas em transferência. (I = 250 A; a = 13,2 mm).	57
Figura 5.14 – Efeito de “I” e do comprimento do arco sobre “V _{CHE} ”	60
Figura 5.15 – Efeito do diâmetro das gotas sobre V _{CHE}	60
Figura 5.16 – Efeito de “I” e do comprimento do arco sobre “A _{MED} ”	63
Figura 5.17 – Geometria obtida nos cordões de solda.....	65
Figura 5.18 – Efeito de “I” e do comprimento do arco sobre a penetração.	66
Figura 5.19 – Efeito de “I” e do comprimento do arco sobre o reforço.	66
Figura 5.20 – Efeito de “I” e do comprimento do arco sobre a largura.	67
Figura 5.21 – Efeito de “I” e do comprimento do arco sobre a área total da solda.....	67
Figura 5.22 – Efeito de “I” e do comprimento do arco (análogo a DBCP) sobre a área fundida.....	68
Figura 5.23 – Efeito da Quantidade de Movimento das gotas impingindo na poça de fusão sobre a penetração.....	70
Figura 5.24 – Efeito da taxa de quantidade de movimento das gotas sobre a penetração do cordão de solda.	70
Figura 5.25 – Efeito da Quantidade de Movimento Efetiva das gotas impingindo na poça de fusão sobre a penetração.....	71
Figura 5.26 – Penetração predita pela Equação 5.1 <i>versus</i> valores experimentais (R ² = 0,94).72	72
Figura 6.1 – Pistola tipo “push-pull” inclinada de 15° na direção “empurrando”.....	75
Figura 6.2 – Características estáticas dos arcos obtidos.	76
Figura 6.3 – Curvas posição x tempo. I = 130 A; DBCP = 18 mm. (a = 6,9 mm).....	78
Figura 6.4 – Curvas posição x tempo. I = 130 A; DBCP = 22 mm. (a = 8 mm).....	79
Figura 6.5 – Curvas posição x tempo. I = 180 A; DBCP = 18 mm. (a = 5,5 mm).....	79

Figura 6.6 – Curvas posição x tempo. I = 180 A; DBCP = 22 mm. (a = 9,4 mm).....	80
Figura 6.7 – Curvas posição x tempo. I = 230 A; DBCP = 18 mm. (a = 7,1 mm).....	80
Figura 6.8 – Curvas posição x tempo. I = 230 A; DBCP = 22 mm. (a = 7,7 mm).....	81
Figura 6.9 – Efeito de I do comprimento de arco sobre V_{CHE}	83
Figura 6.10 – Efeito de I e do comprimento do arco sobre A_{MED}	85
Figura 6.11 – Efeito de I e do comprimento do arco sobre a penetração.....	88
Figura 6.12 – Efeito de I do comprimento do arco sobre o reforço.....	88
Figura 6.13 – Efeito de I do comprimento do arco sobre a largura.....	89
Figura 6.14 – Efeito de I do comprimento do arco sobre a área adicionada.....	89
Figura 6.15 – Efeito de I do comprimento do arco sobre a área fundida.....	90
Figura 6.16 – Efeito da Quantidade de Movimento das gotas impingindo na poça de fusão sobre a penetração.....	91
Figura 6.17 – Efeito da Taxa de Quantidade de Movimento das gotas sobre a penetração do cordão de solda.....	92
Figura 6.18 – Efeito da Quantidade de Movimento efetiva das gotas impingindo na poça de fusão sobre a penetração.....	92
Figura 6.19 – Penetração predita pela equação 6.1 versus valores experimentais ($R^2 = 0,96$). 93	
Figura 7.1 – Tensão medida durante as soldagens para cada DBCP e Gás de proteção.....	98
Figura 7.2 – Comprimento do arco (a), diâmetro das gotas (d) e frequência de destacamento (f) versus Comprimento do arco e Composição do Gás de Proteção.....	100
Figura 7.3 – Posição versus tempo das gotas nas condições dadas de composição do gás de proteção e DBCP. (a = 7,7 mm).....	103
Figura 7.4 – Posição versus tempo das gotas nas condições dadas de composição do gás de proteção e DBCP.(a = 10,9 mm).....	103
Figura 7.5 – Posição versus tempo das gotas nas condições dadas de composição do gás de proteção e DBCP. (a = 7,8 mm).....	103
Figura 7.6 – Posição versus tempo das gotas nas condições dadas de composição do gás de proteção e DBCP. (a = 11,0 mm).....	104
Figura 7.7 – Posição versus tempo das gotas nas condições dadas de composição do gás de proteção e DBCP. (a = 6,9 mm).....	104
Figura 7.8 – Posição versus tempo das gotas nas condições dadas de composição do gás de proteção e DBCP. (a = 10,2 mm).....	104
Figura 7.9 – Posição versus tempo das gotas nas condições dadas de composição do gás de proteção e DBCP. (a = 7,1 mm).....	105
Figura 7.10 – Posição versus tempo das gotas nas condições dadas de composição do gás de proteção e DBCP. (a = 9,6 mm).....	105
Figura 7.11 – Posição versus tempo das gotas nas condições dadas de composição do gás de proteção e DBCP. (a = 6,9 mm).....	105
Figura 7.12 – Posição versus tempo das gotas nas condições dadas de composição do gás de proteção e DBCP. (a = 11,7 mm).....	106
Figura 7.13 – Posição versus tempo das gotas nas condições dadas de composição do gás de proteção e DBCP. (a = 5,9 mm).....	106
Figura 7.14 – Posição versus tempo das gotas nas condições dadas de composição do gás de proteção e DBCP. (a = 11,3 mm).....	106
Figura 7.15 – Efeito da composição do gás de proteção e do comprimento de arco sobre V_{CHE}	107
Figura 7.16 – Efeito do Gás de Proteção e do comprimento do arco sobre a Penetração.....	110
Figura 7.17 – Efeito do Gás de Proteção e do comprimento do arco sobre o Reforço.....	111
Figura 7.18 – Efeito do Gás de Proteção e do comprimento do arco sobre a Largura.....	111
Figura 7.19 – Efeito do Gás de Proteção e do comprimento do arco sobre a Área Total.....	112
Figura 7.20 – Efeito do Gás de Proteção e do comprimento do arco sobre a Área Fundida... 112	
Figura 7.21 – Efeito do Gás de Proteção e do Comprimento do arco sobre a Área Adicionada.....	113
Figura 7.22 – Penetração e Quantidade de Movimento em função da Composição do Gás... 114	

Figura 7.23 – Penetração e Taxa de Quantidade de Movimento em função da Composição do Gás.....	115
Figura 7.24 – Penetração e Quantidade de Movimento Efetiva em função da composição do gás.....	115
Figura 8.1 – Gota assimetricamente repelida e o ponto catódico (Lancaster, 1984).	118
Figura 8.2 – Gota assimetricamente repelida e o ponto catódico (Talkington, 1998).	119
Figura 8.3 – Características da soldagem em CC+ (inversa) e CC- (direta) (Talkington, 1998).	120
Figura 8.4 – Observação do arco voltaico em CC-, I = -200 A.	122
Figura 8.5 – Observação do arco voltaico em CC-, I = -250 A.	122
Figura 8.6 – Curvas posição x tempo, I = 200 A. (a = 14,5 mm)	124
Figura 8.7 – Curvas posição x tempo I = -200 A. (a = 12,5 mm).....	124
Figura 8.8 – Curvas posição x tempo, I = 250 A. (a = 13,2 mm)	125
Figura 8.9 – Curvas posição x tempo, I = -250 A. (a = 12,2 mm).....	125
Figura 8.10 – Efeito da Corrente e da Polaridade sobre V_{CHE}	126
Figura 8.11 – Efeito da corrente e da polaridade sobre A_{MED}	127
Figura 8.12 – Efeito da corrente e da polaridade sobre P.	129
Figura 8.13 – Efeito da corrente e da polaridade sobre R.	130
Figura 8.14 – Efeito da corrente e da polaridade sobre L.	130
Figura 8.15 – Efeito da corrente e da polaridade sobre A_F	131
Figura 8.16 – Efeito da polaridade e Q sobre a penetração da solda.	132
Figura 8.17 – Efeito da polaridade e T sobre a penetração da solda.	132
Figura 8.18 – Efeito da polaridade e Q_e sobre a penetração da solda.	133
Figura 13.1 – Comportamento dinâmico do experimento A ($I_{REG} = 200$ A; DBCP = 18 mm) ...	151
Figura 13.2 – Comportamento dinâmico do experimento B ($I_{REG} = 200$ A; DBCP = 22 mm) ...	151
Figura 13.3 – Comportamento dinâmico do experimento C ($I_{REG} = 200$ A; DBCP = 26 mm) ...	152
Figura 13.4 – Comportamento dinâmico do experimento D ($I_{REG} = 250$ A; DBCP = 18 mm) ...	152
Figura 13.5 – Comportamento dinâmico do experimento E ($I_{REG} = 250$ A; DBCP = 22 mm) ...	153
Figura 13.6 – Comportamento dinâmico do experimento F ($I_{REG} = 250$ A; DBCP = 26 mm)....	153
Figura 13.7 – Comportamento dinâmico do experimento G ($I_{REG} = 300$ A; DBCP = 18 mm) ...	154
Figura 13.8 – Comportamento dinâmico do experimento H ($I_{REG} = 300$ A; DBCP = 22 mm) ...	154
Figura 13.9 – Comportamento dinâmico do experimento I ($I_{REG} = 300$ A; DBCP = 26 mm).....	155
Figura 13.10 – Comportamento dinâmico da soldagem com $I_{REG} = 130$ A e DBCP = 18 mm.	155
Figura 13.11 – Comportamento dinâmico da soldagem com $I_{REG} = 180$ A e DBCP = 18 mm.	156
Figura 13.12 – Comportamento dinâmico da soldagem com $I_{REG} = 230$ A e DBCP = 18 mm.	156
Figura 13.13 – Comportamento dinâmico da soldagem com $I_{REG} = 130$ A e DBCP = 22 mm.	157
Figura 13.14 – Comportamento dinâmico da soldagem com $I_{REG} = 180$ A e DBCP = 22 mm.	157
Figura 13.15 – Comportamento dinâmico da soldagem com $I_{REG} = 230$ A e DBCP = 22 mm.	158
Figura 13.16 – Comportamento dinâmico para DBCP = 18 mm e gás Ar + 5%O ₂	158
Figura 13.17 – Comportamento dinâmico para DBCP = 18 mm e gás Ar + 5%O ₂ + 5% He....	159
Figura 13.18 – Comportamento dinâmico para DBCP = 18 mm e gás Ar + 5%O ₂ + 10% He..	159
Figura 13.19 – Comportamento dinâmico para DBCP = 18 mm e gás Ar + 5%O ₂ + 15% He..	160
Figura 13.20 – Comportamento dinâmico para DBCP = 18 mm e gás Ar + 5%O ₂ + 20% He..	160
Figura 13.21 – Comportamento dinâmico para DBCP = 18 mm e gás Ar + 5%O ₂ + 25% He..	161
Figura 13.22 – Comportamento dinâmico para DBCP = 26 mm e gás Ar + 5%O ₂	161
Figura 13.23 – Comportamento dinâmico para DBCP = 26 mm e gás Ar + 5%O ₂ + 5% He....	162
Figura 13.24 – Comportamento dinâmico para DBCP = 26 mm e gás Ar + 5%O ₂ + 10% He..	162
Figura 13.25 – Comportamento dinâmico para DBCP = 26 mm e gás Ar + 5%O ₂ + 15% He..	163
Figura 13.26 – Comportamento dinâmico para DBCP = 26 mm e gás Ar + 5%O ₂ + 20% He..	163
Figura 13.27 – Comportamento dinâmico para DBCP = 26 mm e gás Ar + 5%O ₂ + 25% He..	164
Figura 13.28 – Comportamento dinâmico da soldagem com $I_{REG} = -200$ A e DBCP = 26 mm.	164
Figura 13.29 – Comportamento dinâmico da soldagem com $I_{REG} = -250$ A e DBCP = 26 mm.	165

Lista de Símbolos

U_{REF}	Tensão de referência
DBCP	Distância bico-de-contato peça
V_a	Velocidade de alimentação do arame eletrodo
I	Corrente
CEF	Característica estática da fonte
A	Comprimento do arco
C	Consumo, Taxa de Fusão do eletrodo
l	Comprimento energizado de eletrodo, “stick-out”
α, β	Constantes da equação do consumo
ρ	Resistividade/ Densidade
ND	Densidade neutra
H	Horizontal
V	Vertical
Dpi	Pontos por polegada
Tiff	Formato de arquivo de imagem
\varnothing	Diâmetro do eletrodo
V_{CHE}	Velocidade de chegada das gotas à poça de fusão
A_{MED}	Aceleração média das gotas durante a trajetória
X	Deslocamento
T	Tempo
R^2	Coeficiente de correlação
Q	Quantidade de movimento
D	Diâmetro das gotas
T	Taxa de quantidade de movimento
F	Frequência de destacamento das gotas
V_s	Velocidade de soldagem
Q_e	Quantidade de movimento efetiva
R	Reforço do cordão de solda
P	Penetração do cordão de solda
L	Largura do cordão de solda
A_{AM}	Área adicionada medida do cordão de solda
A_F	Área fundida do cordão de solda
A_T	Área total do cordão de solda

σ	Desvio padrão
Δ	Diferença, variação
I_{REG}	Corrente de regulação
U_M	Tensão média
I_M	Corrente média
M_g	Massa das gotas
f_{ESP}	Frequência esperada de transferência
ANOVA	Análise de variância
p	Nível de significância
CC+	Corrente contínua polaridade inversa
CC-	Corrente contínua polaridade direta

Capítulo 1

1. Introdução

1.1 Contextualização, motivação e objetivo

O processo MIG/MAG é hoje provavelmente o processo de soldagem de maior aplicação no meio industrial. Uma regulagem ideal dos parâmetros de soldagem para se obter o tipo e manter o modo de transferência metálica neste processo é um dos pontos-chave que definem o desempenho do mesmo em cada aplicação. As próprias variantes genéricas do processo MIG/MAG se relacionam com o nome do modo de transferência metálica, como MIG/MAG curto-circuito, MIG/MAG goticular (“spray”) e MIG/MAG pulsado. De um modo geral, chega-se a dizer que o modo de transferência metálica é que determina a estabilidade do processo. Apesar de ser um conceito errôneo, pois se pode ter a variante por curto-circuito com alta estabilidade na transferência (os chamados processos MIG/MAG com curto-circuito controlado), este fato mostra a importância da transferência metálica no processo. Entretanto, é o modo de transferência, pelo vínculo com a corrente e com o controle da poça de fusão, que determina a possibilidade de se soldar fora da posição plana, soldar chapas finas, fazer passes de raiz, etc. O modo de transferência metálica também está direta ou indiretamente correlacionado com a capacidade de produção (massa depositada por unidade de comprimento ou tempo do cordão), geração de respingos, acabamento do cordão, entre outras características operacionais.

A relação entre o modo de transferência metálica e as características operacionais acima mencionadas já são razoavelmente conhecidas, e as informações técnicas sobre as mesmas disponibilizadas na literatura corrente. Citam-se, como exemplos:

- A eliminação dos respingos e melhoria do acabamento dos cordões quando se substitui uma soldagem por curto-circuito convencional por uma outra com transferência pulsada ou goticular;
- Os bons desempenhos obtidos na soldagem de chapas finas quando da utilização do modo curto-circuito controlado e na seleção de parâmetros (inclusive a indutância da fonte de soldagem) para otimização da soldagem por curto-circuito fora da posição plana; e
- O aumento na taxa de deposição com a mesma corrente média de soldagem ao se substituir a transferência por curto-circuito por pulsado.

Os fatos enunciados fazem da transferência metálica um objeto de estudo bastante explorado. Um fenômeno já há muito estudado, mas ainda pouco esclarecido na soldagem MIG/MAG é o efeito da gota em transferência sobre a formação do cordão. Essers & Walter, em 1981, apontaram em um artigo experimental a correlação entre o impulso das gotas e a profundidade da penetração. Dois anos mais tarde, Waszink e Graat publicaram resultados práticos para mostrar que a velocidade com que as gotas chegam à poça, a qual é componente de seu impulso (momentum), é afetada pela aceleração causada pelo fluxo de gás no arco. Já no final da década de 80, Mazumder e Tekriwal aproveitaram esses conhecimentos e desenvolveram um modelo para prever penetração do cordão no qual entram o efeito das gotas e da convecção na poça. Kim e Na, em meados dos anos 1990, na mesma direção, mas com mais recursos computacionais, consideraram em seu modelo de formação do cordão a deposição do metal de adição, mas apenas estimando-se (e não medindo) a massa, a velocidade e a taxa de destacamento das gotas para a poça. No final da década de 90, Murray e Scotti, em uma abordagem experimental (análise adimensional), avaliaram a importância das gotas em transferência na penetração de cordões feitos em chapas de aço inoxidável, destacando o efeito de uma alta frequência de gotas impingindo na poça com “momentum” suficiente para levar energia ao fundo da poça.

Wang e Tsai, no início do século 21 calcularam as dimensões e tamanho da poça de fusão através do cálculo da sua distribuição de temperatura causada pela combinação do impulso (momentum) das gotas que chegam à poça de fusão, da força eletromagnética, da força devida à tensão superficial, e da força gravitacional. Dois anos mais tarde, Kim e seus colaboradores descreveram o fluxo de calor e os ciclos térmicos em soldagem de ângulo por MIG/MAG, utilizando-se de um modelo tridimensional. Neste estudo, as gotas metálicas foram consideradas fontes volumétricas de calor e o autor calculou as características cinemáticas, como a aceleração das gotas e da transferência metálica a partir de equações geradas da regressão múltipla de dados experimentais. Ainda no início dos anos 2000, Fan e Kovacevic consideraram em seu modelo numérico da soldagem MIG/MAG os efeitos de transferência de calor no arco, da transferência de massa do eletrodo como um todo, do fluxo de gás no arco e da transferência de calor e escoamento do fluido na poça de fusão, mas também incluíram o efeito de como as gotas nela chegam. Esses pesquisadores usaram dados experimentais sobre transferência metálica para refinar seus modelos. Hu e Tsai recentemente apresentam resultados de suas modelagem do arco e do metal com premissas similares às de Fan & Kovacevic, inclusive utilizando-se dos mesmos dados experimentais.

Contudo, cada um desses modelos apresenta limitações das mais diversas. Além dos recursos computacionais, as condições laboratoriais para levantamento de dados sobre a transferência metálica eram bem limitadas (estes modelos são incapazes de considerar todas

as condições de contorno, fenômenos governantes e características intrínsecas da transferência metálica). Ou seja, houve grandes contribuições dentro da especificidade de cada caso, mas ainda não foi possível encontrar modelos genéricos. Uma das razões é que estes modelos trabalham ou negligenciando ou apenas estimando analiticamente os efeitos cinemáticos e dinâmicos das gotas em transferência, tais como velocidade de chegada à poça e dinâmicos, como sua quantidade de movimento, embora já existam ferramentas mais eficazes para estimá-las e medi-las.

Por outro lado, aprimoramentos razoavelmente recentes de técnicas de visualização do arco e de monitoração e tratamento de sinais elétricos têm possibilitado importantes acréscimos aos conhecimentos sobre este assunto, mantendo a importância da continuidade dos estudos experimentais sobre transferência metálica no processo MIG/MAG. Existe ainda a possibilidade de se dar outro enfoque ao efeito da energia carregada pela gota sobre a formação do cordão.

Nesse contexto, objetiva-se com este trabalho:

- Elaborar e avaliar uma metodologia experimental de determinação das características cinemáticas e dinâmicas das gotas em transferência;
- Aplicar esta metodologia em condições específicas de soldagem, determinadas para se obter diferentes comprimentos de arco e transferências metálicas;
- Avaliar o efeito de variáveis do processo de soldagem (corrente e comprimento do arco, material, gás de proteção e polaridade) sobre o comportamento das características cinemáticas e dinâmicas das gotas em transferência (nos diversos modos);
- Avaliar o efeito das características cinemáticas e dinâmicas determinadas sobre a geometria dos cordões de solda;
- Discutir os resultados gerados enfatizando o efeito final da transferência metálica sobre a formação do cordão de solda.

Espera-se com isto não só um melhor entendimento do fenômeno correlacionado com os modos de transferência, mas sobretudo fornecer dados determinados experimentalmente para validação ou aperfeiçoamento de modelos determinísticos ou estocásticos.

1.2 Descrição do conteúdo apresentado

Uma revisão bibliográfica apontando alguns trabalhos de modelagem do processo de soldagem MIG/MAG, bem como medições e cálculos das características cinemáticas das

gotas em transferência neste processo é apresentada no Capítulo 2.

No Capítulo 3, apresenta-se a metodologia utilizada para fazer este estudo, destacando-se as principais técnicas e equipamentos utilizados. Uma avaliação desta metodologia é apresentada no Capítulo 4, onde através de uma montagem simples se pode simular experimentalmente a transferência metálica, através da utilização de “falsas gotas”.

Os capítulos 5 e 6 apresentam avaliações da cinemática e dinâmica da transferência metálica, a determinação da quantidade de movimento efetiva das gotas em transferência, bem como seus efeitos na geometria dos cordões de solda de aço carbono e alumínio, respectivamente.

O efeito da utilização de gás hélio como componente do gás de proteção sobre a transferência metálica, suas características cinemáticas e dinâmicas e sobre a geometria da solda utilizando eletrodo de aço carbono é apresentado no Capítulo 7. Ainda utilizando eletrodo de aço carbono, o Capítulo 8 apresenta o efeito da utilização de polaridade direta ou inversa nas características cinemáticas e dinâmicas das gotas em transferência, bem como na geometria dos cordões de solda.

No Capítulo 9 é apresentada uma concatenação de todos os resultados obtidos e são feitas as considerações finais sobre a discussão destes resultados.

No Capítulo 10 destacam-se as principais conclusões obtidas neste trabalho.

As sugestões para trabalhos futuros são levantadas no Capítulo 11 e, por fim, o Capítulo 12 traz as Referências Bibliográficas citadas no texto.

Adicionalmente, o Anexo I mostra o comportamento dinâmico da fonte de soldagem durante os experimentos realizados, e o Anexo II apresenta um relatório técnico do equipamento misturador de gases industriais utilizado no Capítulo 7.

Capítulo 2

2. Revisão Bibliográfica

Em termos gerais, o processo de soldagem MIG/MAG usa um arame-eletrodo de metal consumível, alimentado continuamente, que, ao conduzir a corrente de soldagem em uma atmosfera adequada, se funde devido ao calor gerado na conexão do arco elétrico com sua ponta e, em menor intensidade, ao calor por efeito Joule ao longo do seu comprimento energizado. Sabe-se que um ajuste ideal dos parâmetros de soldagem, para se obter o tipo, o controle ou a variação instantânea do modo de transferência metálica neste processo é um dos pontos-chave para a obtenção de soldas isentas de descontinuidades (Silva & Scotti, 2003), com a maior produtividade possível (Farias, 2002), ótima relação custo-benefício (Correia, 2003), bem como esteticamente agradáveis (Silva, 2003) e ecologicamente corretas no tocante aos fumos gerados (Silva Neto & Maciel, 2003). Por isso, transferência metálica na soldagem MIG/MAG tem sido um objeto de estudo bastante explorado.

Contudo, ainda existem inúmeras questões a serem respondidas sobre este tema. A técnica de modelagem numérica da transferência metálica em soldagem MIG/MAG vem sendo empregada para tal e resultados promissores têm sido obtidos (Wang e Tsai, 2001; Kim et al, 2003; Fan e Kovacevic, 1998, 1999, 2004). Técnicas de modelagem experimental também têm sido testadas. Por exemplo, Lowke (1997) apresenta uma equação empírica para determinação da corrente de transição entre a transferência globular e goticular. Porém, estes modelos são ainda incapazes de considerar todas as condições de contorno, como por exemplo, pequenas variações na composição do gás de proteção, tal como avaliado experimentalmente por Scotti (1998).

Por isto, o estudo experimental sobre transferência metálica no processo MIG/MAG continua mantendo sua importância. Aprimoramentos ao longo dos últimos anos, em particular no âmbito do Laprosolda da UFU, de técnicas de visualização (Bálsamo et al, 2000) e de monitoração e tratamento de sinais elétricos têm possibilitado importantes acréscimos aos conhecimentos sobre este assunto. Scotti (2000), por exemplo, demonstrou que a mudança de argônio ultrapuro para argônio com pureza comercial como gás de proteção altera a corrente de transição globular/goticular e a frequência de destacamento de gotas após esta transição, fato não visualizado em mapas de transferência convencionais. Isto só foi possível pelo uso da técnica de perfilografia (também conhecida como shadowgrafia) com filmagem em altas velocidades e por tempo relativamente longo. Outros exemplos, tornados possíveis agora pelo uso da perfilografia sincronizada com os sinais elétricos, são o desenvolvimento de

metodologias para determinação de quedas de tensão em arcos de soldagem (Scotti et al, 2006) e evidências de que a resistividade elétrica da gota é maior do que a do próprio arco e eletrodo (Ponomarev et al, 2002).

De uma forma mais aplicada, a empresa Lincoln Electric CO. (2001) desenvolveu um equipamento baseado no controle da transferência metálica em curto-circuito (STT), o qual é suposto reduzir drasticamente a quantidade de respingos sem comprometer a eficiência do processo, tal como o sistema CCC (Curto-Circuito Controlado) do LABSOLDA/EMC (Gorh et al, 2003). Já Miranda et al (2003, 2007) desenvolveram um sistema de observação e controle de transferência metálica em tempo real no processo MIG/MAG Pulsado, através de sensoriamento óptico, validando esta concepção através da técnica da shadowgrafia sincronizada. Todos estes desenvolvimentos só se tornaram possíveis graças à criação e ao aprimoramento das técnicas de observação e mensuração da transferência metálica, bem como dos sinais elétricos da soldagem.

2.1 Modelos referentes à soldagem MIG/MAG

A transferência metálica afeta muitos aspectos do processo de soldagem, inclusive o tamanho, a forma e a profundidade de penetração da poça de fusão. Alguns modelos teóricos de transferência de calor têm sido usados para predizer o tamanho e forma da área transversal do metal fundido. São exemplos importantes os modelos de Adams (1958), baseado no modelo de Rosenthal (1946) de uma fonte de energia pontual móvel, e a própria extensão do modelo de Adams para uma fonte de energia distribuída, obtida por Eagar & Tsai (1983). Estes modelos assumem só a transferência de energia por condução em regime estacionário ao metal de base. Desta forma, o volume da poça de fusão depende do fluxo de calor no metal de base, da mudança na entalpia que é exigida para fundir o metal de base, da difusividade térmica do metal de base e da velocidade de soldagem. Porém, não são incluídos os efeitos de transferência de calor por convecção na poça de fusão e a deposição do metal de adição. Para superar a primeira simplificação, Mazumder & Tekriwal (1988) desenvolveram um modelo levando em conta o efeito da convecção. Outros avanços foram alcançados com modelos de fluxo fluido, como os de Tsao & Wu (1988) e Kim & Na (1995). Com estes modelos foi obtida uma boa aproximação entre as formas real e simulada da poça de fusão, adicionando-se, além do efeito da transferência de calor por convecção na poça de fusão (Figura 2.1), a deposição do metal de adição (Figura 2.2). Porém, o efeito da deposição de metal foi incluído apenas estimando-se a massa, a velocidade e a taxa de destacamento das gotas para a poça, em lugar de se fazer medições ou simulações numéricas da dinâmica do destacamento das gotas do eletrodo.

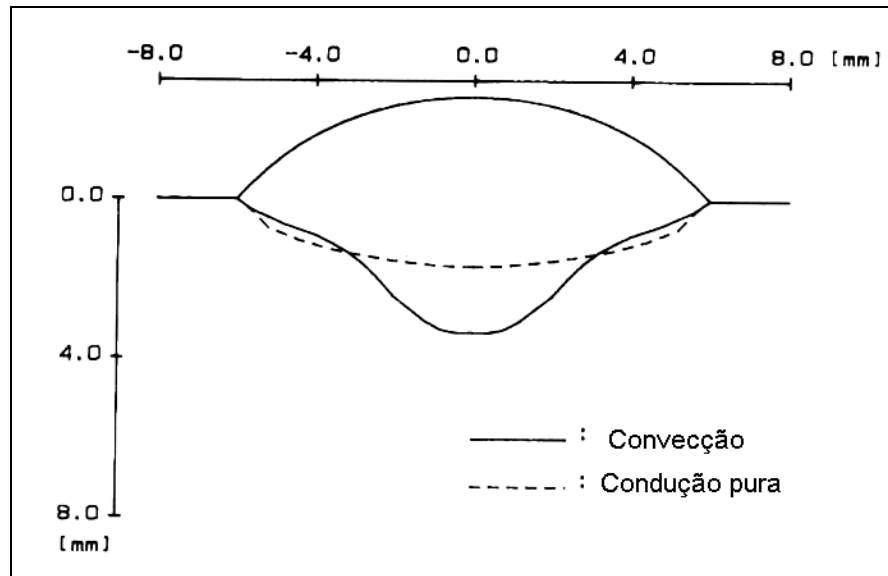


Figura 2.1 – Efeito da consideração da convecção na poça no modelo de Kim & Na (1995).

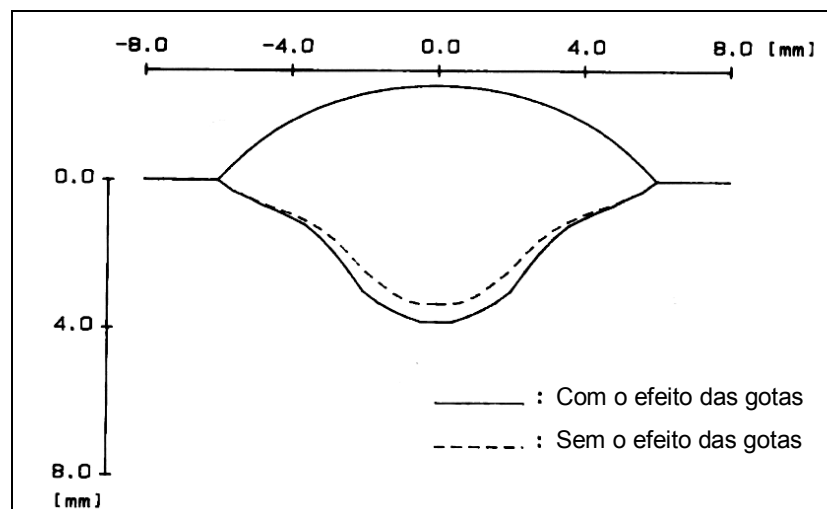


Figura 2.2 – Efeito da consideração de uma estimativa do momentum das gotas no modelo de Kim & Na (1995)

Dados experimentais fornecidos por Essers & Walter (1981) sugerem uma relação entre o impulso das gotas que caem na poça e a profundidade de penetração. Em particular, Essers & Walter (1981) correlacionaram o impulso das gotas e a profundidade da penetração para explicar a presença de uma penetração profunda e estreita que é observada freqüentemente em MIG/MAG com proteção à base de argônio. Isto apenas sugere que a penetração seja afetada pela massa, velocidade e freqüência de gotas que chegam à poça. Waszink & Graat (1983) citam que a massa, velocidade e taxa de destacamento das gotas expelidas do eletrodo são determinadas pela taxa de fusão do eletrodo e a resultante eletromagnética, gravitacional, inercial e de arraste que age em uma gota que se forma à ponta

do eletrodo. Além disso, de acordo com esses autores, a velocidade com que as gotas chegam à poça é afetada pela aceleração causada pelo fluxo de gás no arco. Uma recente tendência em estudos numéricos da poça de fusão tem sido tentar desenvolver modelos que incluem todos os efeitos de transferência de calor no arco, transferência de massa do eletrodo, fluxo de gás no arco, transferência de calor e escoamento do fluido na poça de fusão, bem como as gotas que nela chegam (Fan & Kovacevic, 2004).

Avaliando numericamente a soldagem MIG/MAG estacionária, ou seja, sem deslocamento do arco em relação à peça, Wang & Tsai (2001) calcularam as dimensões e tamanho da poça de fusão como uma função do tempo. Foi calculada uma velocidade de fluxo fluido, bem como as distribuições de temperatura na poça de fusão causadas pela combinação do impulso das gotas que chegam à poça de fusão, da força eletromagnética, da força devida à tensão superficial e da força gravitacional. Segundo estes autores, para o MIG/MAG estacionário, o momentum da gota é convertido em energia cinética e potencial do fluido na poça de fusão e a penetração da solda seria causada principalmente pela força devida à tensão superficial. Este estudo, apesar de também levar em consideração a modelagem matemática do momentum das gotas, (Figura 2.3) não verifica experimentalmente seus valores e apresenta, apesar de seu grande valor científico, uma significativa limitação prática: não leva em consideração a translação da poça em uma direção, o que provocaria uma mudança substancial nos resultados.

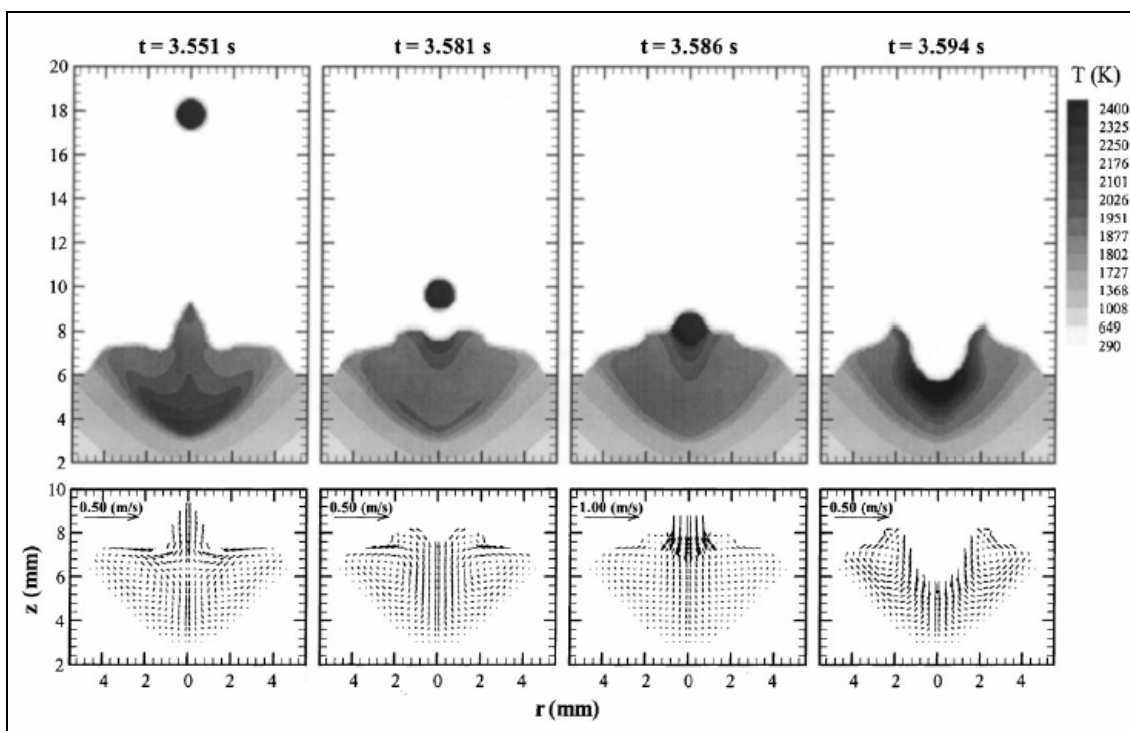


Figura 2.3 – Sequência de queda de uma gota e as distribuições de temperatura e velocidades do fluxo fluido obtidos por Wang & Tsai (2001).

Já Kim et al. (2003) modelaram o fluxo de calor e os ciclos térmicos em soldagem de filetes por MIG/MAG, utilizando-se um modelo tridimensional. Neste estudo, as gotas metálicas são consideradas fontes volumétricas de calor e o autor calcula as características cinemáticas e da transferência metálica à partir de equações geradas da regressão múltipla de dados experimentais, como mostra a Figura 2.4.

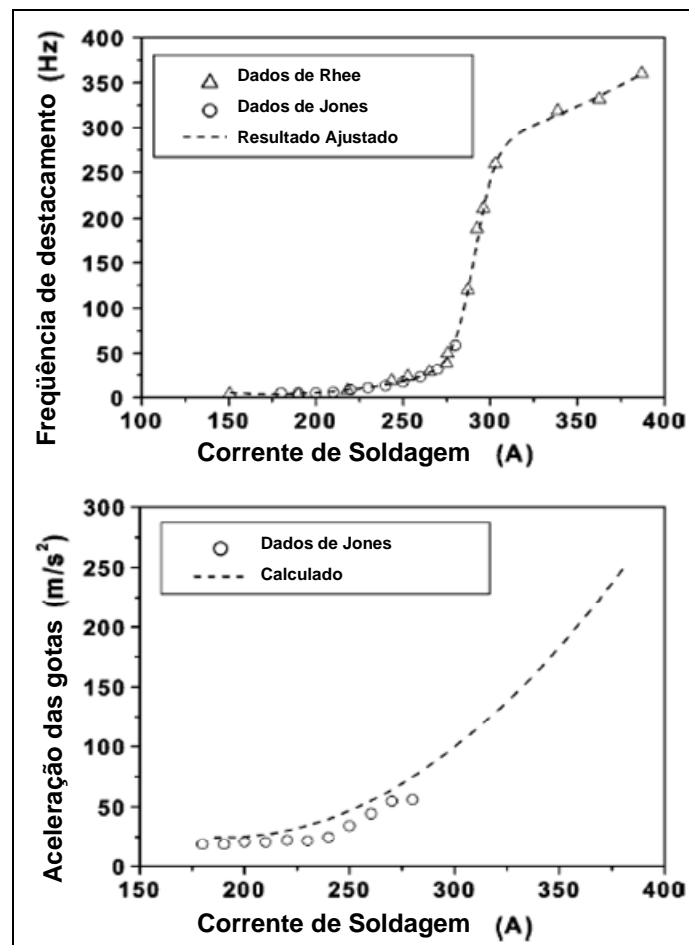


Figura 2.4 – Dados experimentais e curvas levantadas por regressão utilizados no modelo de Kim et al. (2003).

Uma avaliação do modelo de Kim et al. (2003) é apresentada na Figura 2.5, onde se pode observar a acuidade do modelo na predição do perfil da penetração obtida experimentalmente em diversas combinações diferentes de parâmetros de soldagem, através das isothermas desenhadas sobre as macrografias. Esta figura revela uma aproximação bastante razoável, principalmente no tocante à ocorrência do “finger-like”, uma penetração profunda e estreita freqüentemente observada na soldagem MIG/MAG com proteção rica em argônio. Mas segundo os autores, pode-se ainda observar alguma discrepância na comparação do perfil predito com o observado nos cordões “c”, “e”, “g” e “h” da Figura 2.5. Os

autores justificam o ocorrido pela não consideração de tensões térmicas inerentes ao processo e a uma razoável distorção observada nos casos citados.

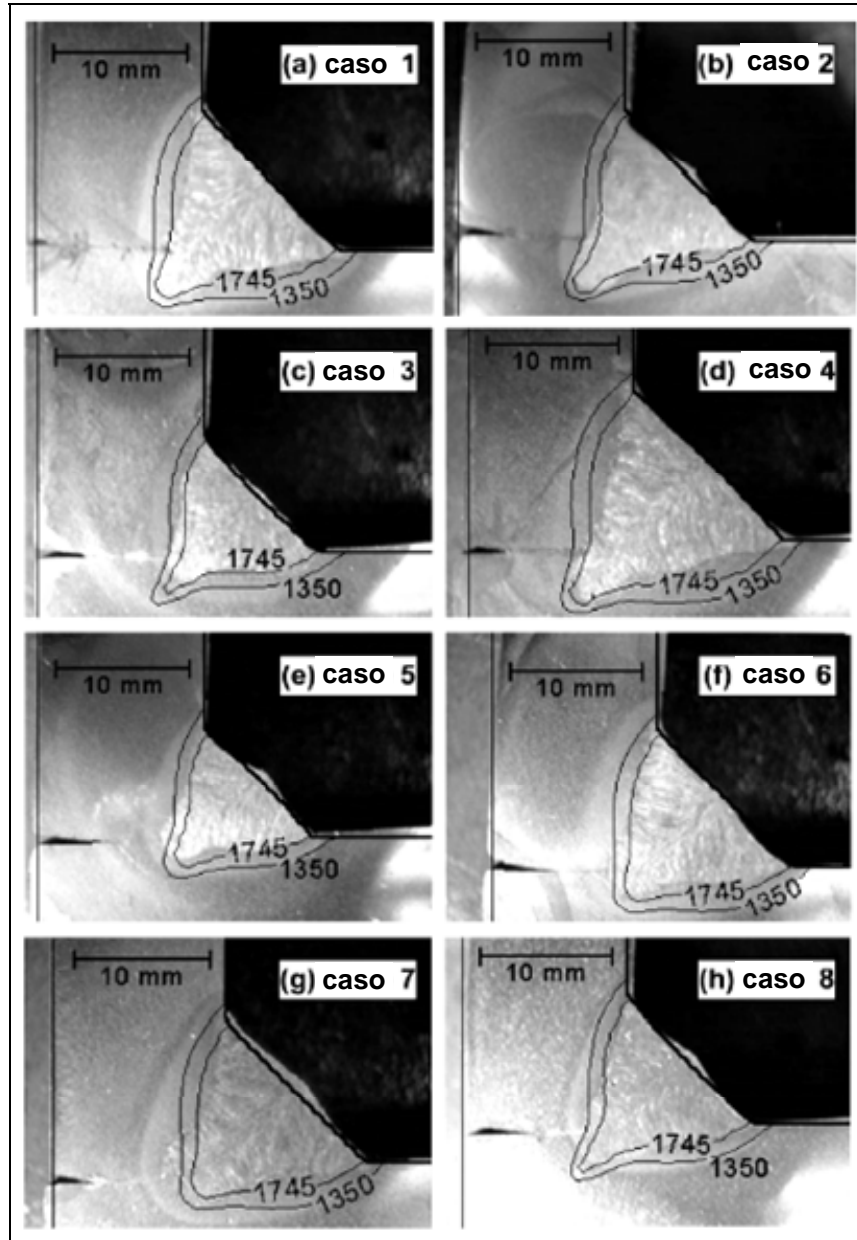


Figura 2.5 – Verificação da acuidade do modelo de Kim et al. (2003) em diversas condições de soldagem. As isothermas apresentadas estão em K.

Miyasaka et al (2006) utilizaram relações de transferência de calor e massa para modelar a soldagem MIG/MAG em diversas juntas e verificaram seus resultados através de experimentos. Seu artigo não faz referência ao modo de transferência metálica, mas pode-se supor pelas correntes e tensões utilizadas, de 230 a 250 A e de 26,5 a 31 V, ter sido empregado o modo goticular de transferência metálica. Os autores também não fizeram

referência às características cinemáticas e dinâmicas das gotas, mas seu modelo obteve boa aproximação com resultados experimentais, como mostram a Figura 2.6 e a Figura 2.7.

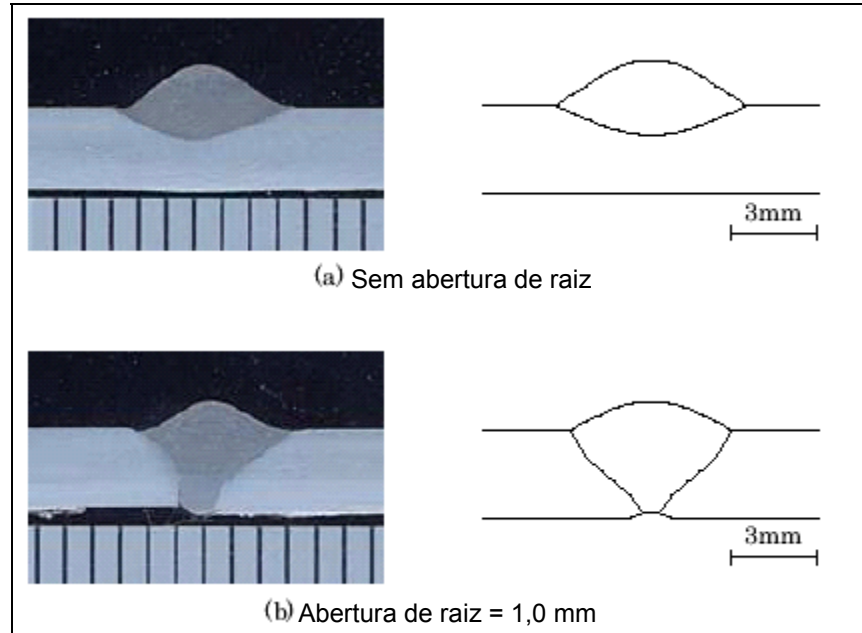


Figura 2.6 – Resultado experimental e simulado do modelo de Miyasaka et al (2006) para juntas de topo.

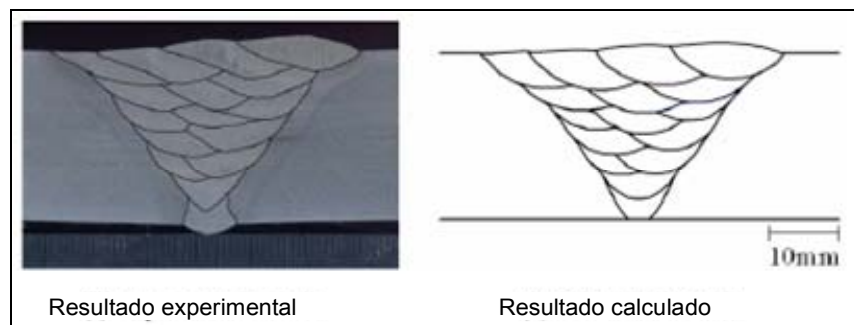


Figura 2.7 – Resultado experimental e simulado de Miyasaka et al (2006) para soldagem multipasse.

Recentemente, Hu & Tsai publicaram uma simulação bastante completa do arco de soldagem (2007a) e do eletrodo e metal de solda (2007b) no MIG/MAG, modelando através da técnica de volume de fluido (VOF, a mesma utilizada por Fan & Kovacevic (2004)) todas as nuances de transferência de calor, massa e momentum deste processo numa soldagem estacionária. O modelo proposto para o arco (Hu & Tsai 2007a) apresenta uma distribuição de temperaturas na transferência que considera também as interações entre metal líquido e sólido na ponta do eletrodo, ilustrada na Figura 2.8. Também apresentaram uma distribuição da corrente na transferência, como na Figura 2.9. Este modelo do arco ilustra inclusive os vórtices provocados no arco quando a gota se aproxima da poça, como pode ser visto na Figura 2.10.

Na Figura 2.11 ainda se pode observar que a pressão do arco obtida por esses pesquisadores é sempre maior na parte inferior da gota ainda presa, e entre o eletrodo e a gota em transferência logo após o destacamento.

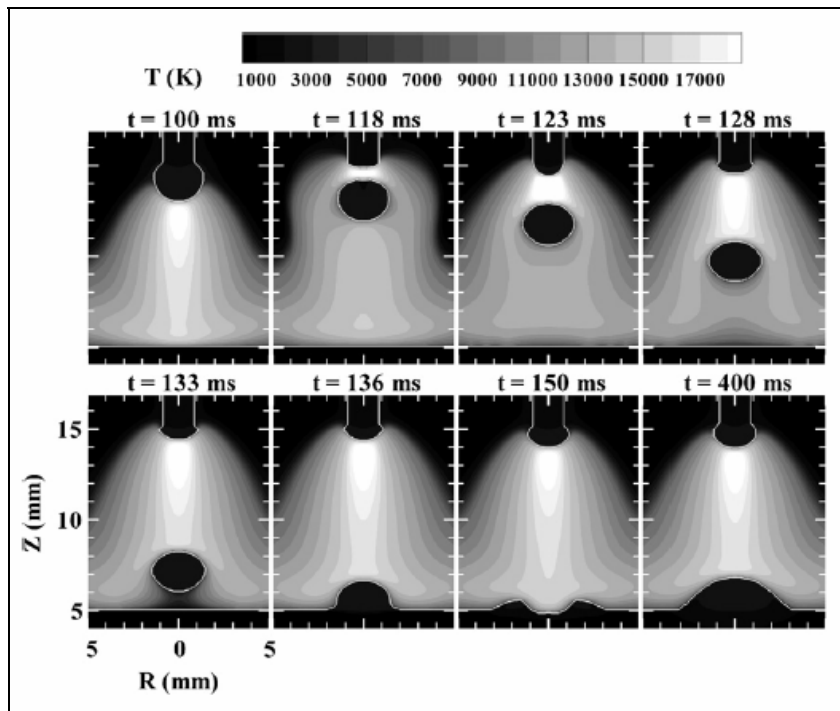


Figura 2.8 – Distribuição de temperatura durante a transferência metálica obtida por Hu & Tsai (2007a).

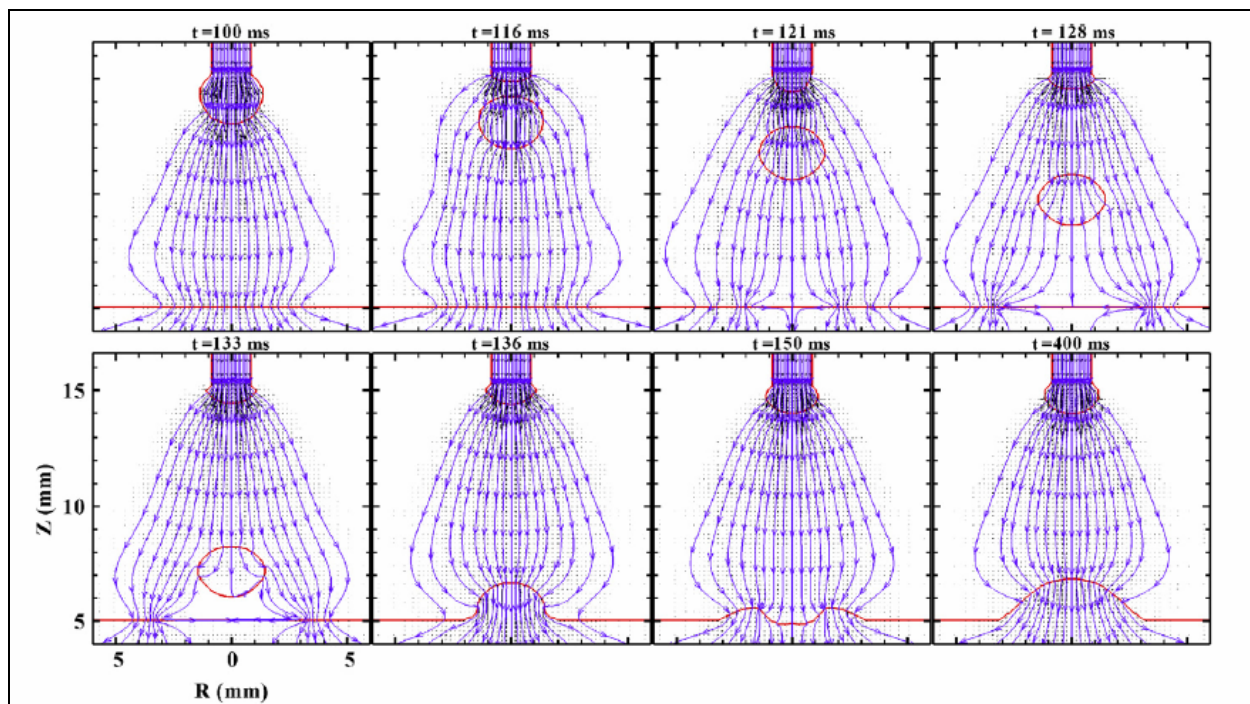


Figura 2.9 – Distribuição de corrente no arco durante a transferência metálica obtida por Hu & Tsai (2007a).

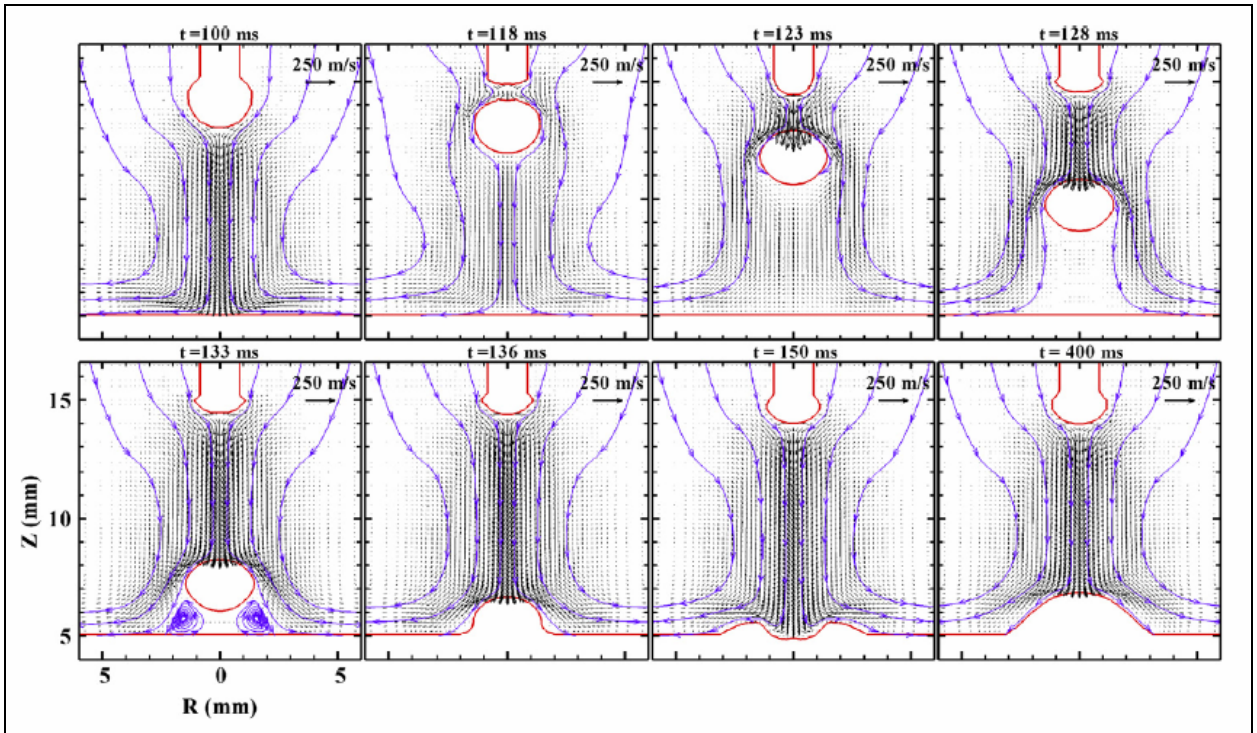


Figura 2.10 – Distribuição de velocidades do fluxo durante a transferência metálica obtida por Hu & Tsai (2007a)

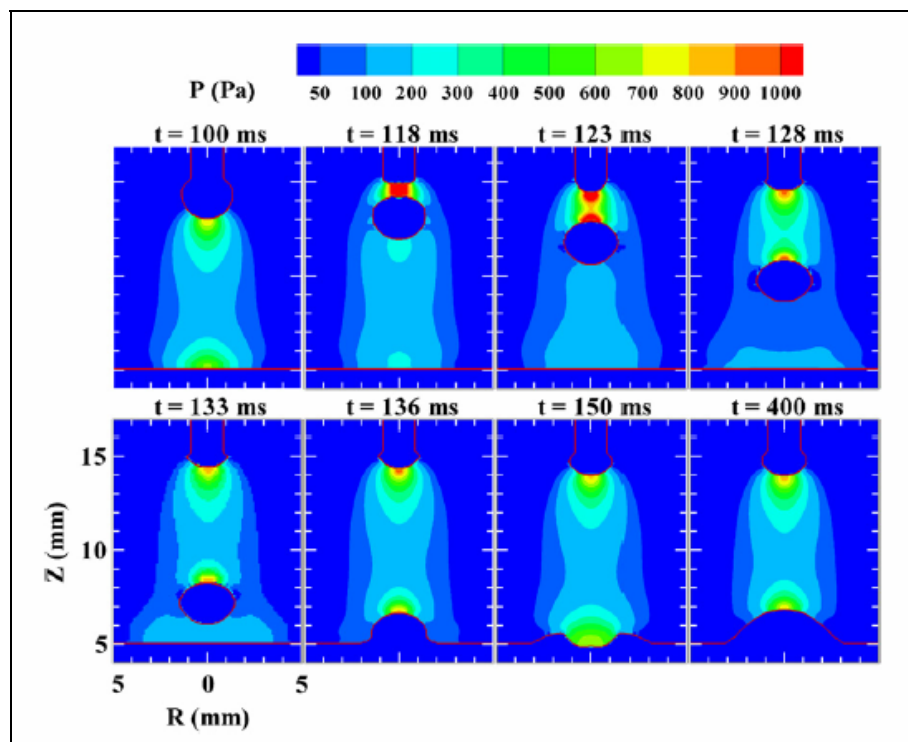


Figura 2.11 – Distribuição de pressão no arco durante a transferência metálica obtida por Hu & Tsai (2007)

Hu & Tsai (2007b) simularam o metal de solda em transferência sob o efeito do arco que haviam simulado, utilizando gás de proteção composto de Ar + 5% O₂. Foi obtida a distribuição de temperatura no eletrodo, na gota e na poça para as primeiras gotas geradas, como mostra a Figura 2.12. Também foi calculada a velocidade do metal líquido na gota e na poça de fusão, como é mostrado na Figura 2.13, onde a escala do vetor é disposta com dois valores: acima do vetor de referencia para velocidades na gota, e abaixo do mesmo para velocidades na poça de fusão. Os autores ainda obtiveram o perfil simulado do cordão após o desligamento do arco, que é apresentado na Figura 2.14. Não foi, entretanto, realizada parte experimental neste trabalho.

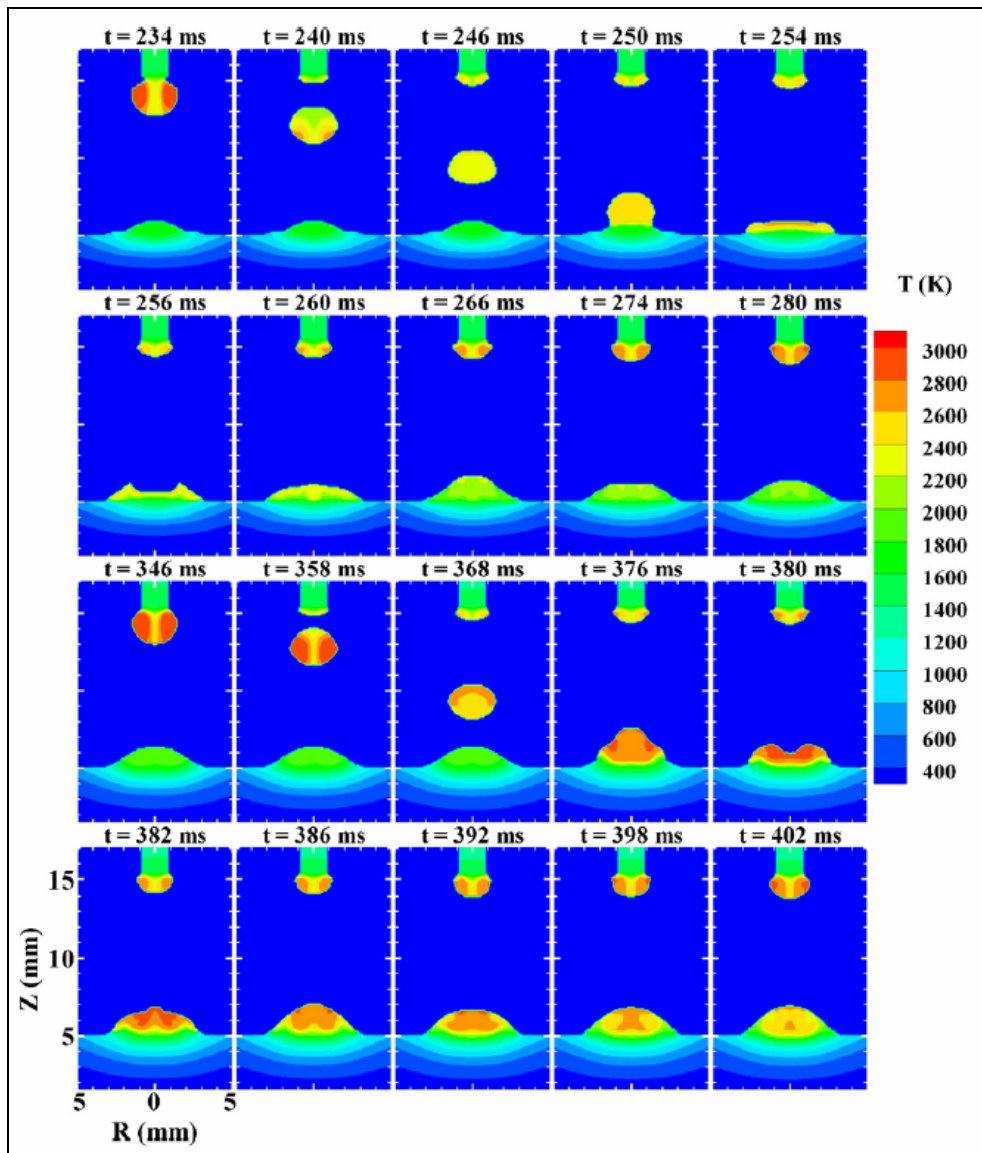


Figura 2.12 – Distribuição de temperatura no eletrodo, gota e poça durante a transferência metálica. Adaptado de Hu & Tsai (2007b).

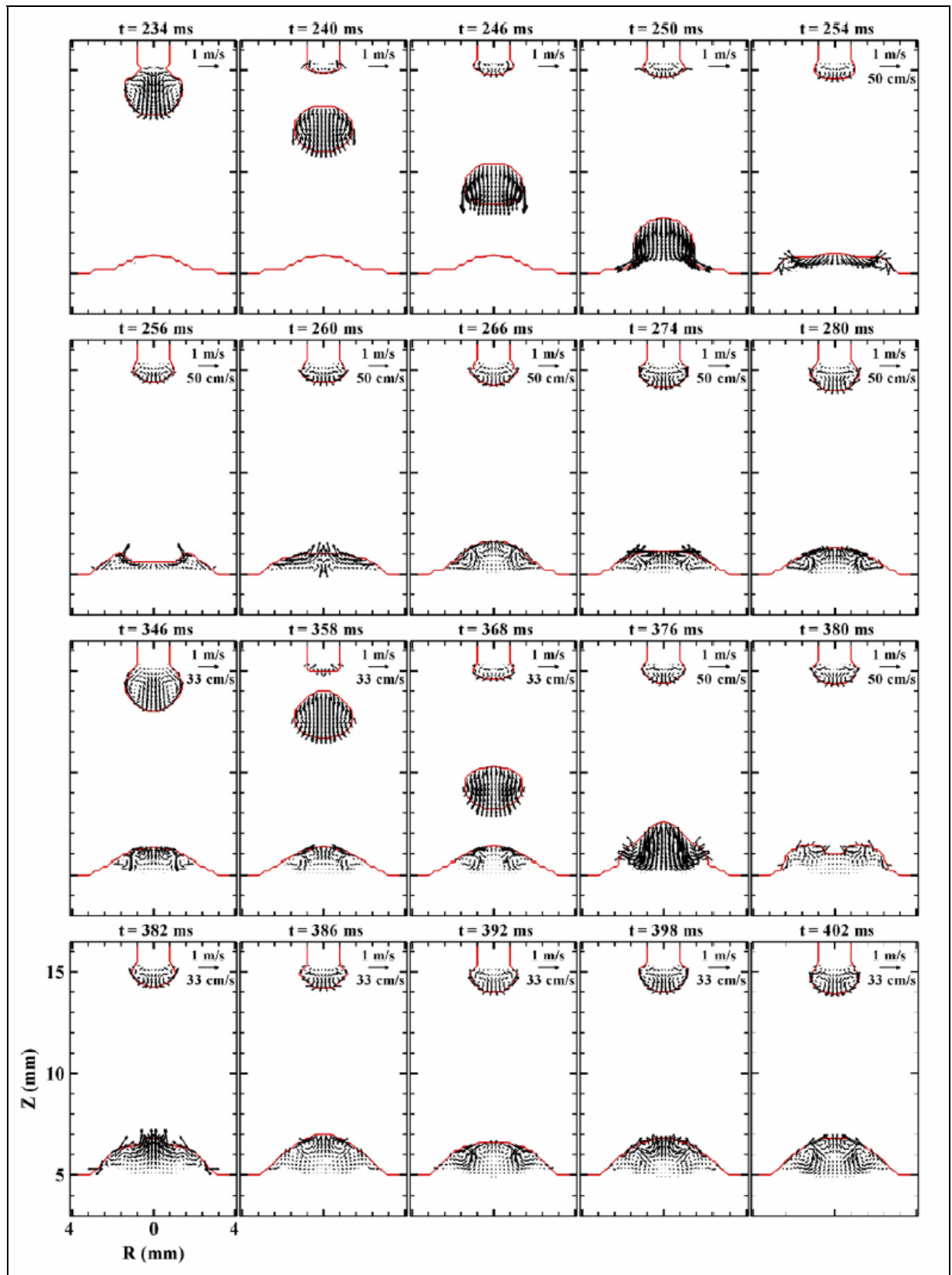


Figura 2.13 – Velocidades do metal na gota e poça de fusão durante a transferência metálica. Adaptado de Hu & Tsai (2007b).

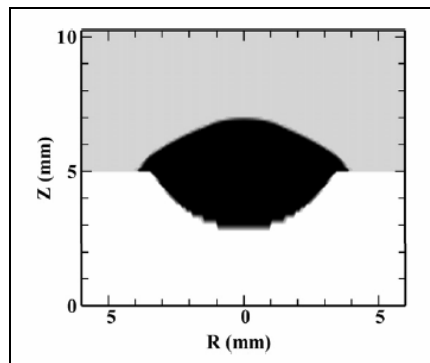


Figura 2.14 – Perfil simulado do cordão de solda de MIG/MAG em aço carbono obtido por Hu & Tsai (2007).

Através de uma abordagem experimental, Murray & Scotti (1999) apresentaram um modelo estocástico do comportamento da penetração do cordão de solda em soldagem MIG/MAG de um aço inoxidável. Este modelo foi baseado na suposição de que a transferência de calor e a de massa para a poça de fusão podem ser correlacionadas com a penetração do cordão por uma relação adimensional. Esta correlação levou esses pesquisadores a uma expressão analítica para a penetração envolvendo constantes empíricas, as quais são relacionadas com a eficiência térmica e a transferência de massa para a poça de fusão. A precisão do modelo foi examinada comparando-se a profundidade teórica da penetração (predita) e a profundidade medida da poça de fusão para uma gama de variáveis do processo que abrangem, inclusive, transferência metálica por curto-circuito (“short arc transfer”), modos mistos de transferência (“mixed transfer”) e transferência metálica por vôo livre do tipo goticular com alongamento (“streaming transfer”), conforme indicado na Figura 2.15.

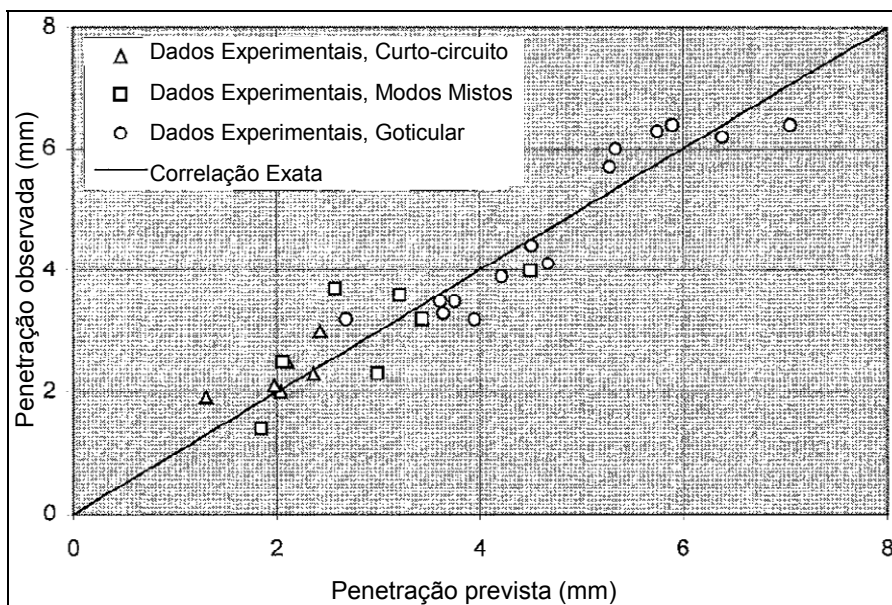


Figura 2.15 – Avaliação do modelo de Murray & Scotti (1999).

Os resultados de Murray & Scotti (1999), utilizando gás de proteção rico em argônio, confirmaram que a penetração foi afetada por variações na taxa de transferência de massa. Neste trabalho, sugere-se que a penetração é afetada por uma alta frequência de gotas com impulso suficiente para levar energia ao fundo poça, aumentando assim a mistura convectiva. Esta relação também havia sido apontada nos trabalhos numéricos de Fan & Kovacevic (1998, 1999), onde os autores utilizaram técnicas de “volume de fluido” para modelar a transferência e a perfilografia para observá-la.

Nagesh & Datta (2002) também desenvolveram um modelo experimental, este baseado em redes neurais e focado em soldagem por eletrodos revestidos. Esses autores citam que a transferência de calor, o comprimento do arco e a “força do arco” são os principais fatores que afetam a penetração (profundidade e área) do cordão de solda daquele processo.

2.2 Observação e mensuração de gotas em movimento

De uma forma genérica (não especificamente para soldagem), técnicas de filmagem e de observações fotográficas permitem determinar a forma e também a dimensão de gotas. Técnicas de vídeo baseadas em fenômenos periódicos (obturação e/ou estroboscópio) permitem estudar a evolu o temporal da forma, do tamanho, e adicionalmente, a velocidade das gotas também pode ser determinada.

Para gotas viajando ao ar ou ao vácuo, há alguns instrumentos consolidados para a determina o das características de seu movimento. O velocímetro “Laser Doppler” (LDV) (Drain, 1980) e o velocímetro “Phase Doppler” (PDV) (Albrecht et al, 2000) são os métodos-padrão para se determinar a velocidade e o tamanho de gotas, respectivamente. Com o uso destes instrumentos, a velocidade, frequência e/ou o tamanho das gotas   determinado em um dado ponto do caminho das gotas, de forma unidimensional. Quando as partículas são suficientemente pequenas (n voa, por exemplo), estes métodos podem ser utilizados para a determina o da velocidade do fluxo. Uma análise estatística pode ser empregada para determinar as propriedades de fluxos não-estacionários (Fronh & Roth, 2000). Velocidades de gotículas em um fluxo de n voa podem ser também determinadas através do uso de um velocímetro de Laser-2-focos (L2F) (Schodl, 1986). Os métodos citados até aqui têm como referência a distância entre as franjas do laser utilizado. Entretanto, há métodos que utilizam a posi o da gota em si como referencial. Dentre eles, destaca-se o velocímetro de imagem das partículas (PIV) (Raffel et al, 1998), que permite a determina o da velocidade do fluido ou das gotas em um ponto num plano de fluxo, o que permite obter a velocidade bidimensional. Modifica es especiais desta técnica permitem a determina o adicional do tamanho das partículas (Fronh & Roth, 2000).

Para o caso de gotas viajando em meios com propriedades bastante particulares, como no caso do arco voltaico, os métodos acima citados tornam-se dependentes de um aparato laboratorial resistente, confiável e caro. Contudo, no estudo de transferência metálica em soldagem MIG/MAG, diversos pesquisadores vêm medindo a frequência, a velocidade e a dimensão das gotas em transferência, se utilizando de outros métodos, descritos a seguir.

Lesnewich (1958) investigou o fenômeno da transferência metálica em alguns parâmetros para aço carbono. Ele observou que havia uma grande mudança na frequência das gotas em uma pequena faixa de corrente, a qual foi chamada de corrente de transição. Esta, por sua vez, aumenta com a diminuição da extensão de eletrodo percorrida por corrente e com o aumento do diâmetro do eletrodo. Lesnewich mediu a frequência das gotas e a extensão de eletrodo percorrida por corrente usando um sofisticado (para a época) sistema oscilográfico de ultravioleta (UVO), posteriormente descrito por Allum (1983) e criticado por Rhee & Kannatey-Asibu (1992) por não permitir a gravação das imagens.

Medições de velocidades e acelerações das gotas em transferência globular na soldagem MIG/MAG também já haviam sido tentadas (Ludwig, 1957; e Caron, 1962), utilizando-se fotografias com taxa de obturação relativamente alta. Entretanto, esta técnica, apesar de permitir o registro das imagens, não tinha sensibilidade para viabilizar medidas em transferência goticular. Utilizando metodologia similar, Needham et al. (1960) afirmam que as gotas são aceleradas pela dragagem no plasma, enquanto Ma & Apps (1983) propuseram que a velocidade das gotas seria constante no tempo durante a transferência. Esta contradição nos resultados revela a pouca robustez da técnica empregada pelos autores.

Já na última década do século XX, Rhee & Kannatey-Asibu (1992) investigaram o fenômeno da transferência metálica utilizando um analisador de vídeo digital de alta velocidade associado a um sistema de laser, lentes e filtros, captando a sombra dos elementos sólidos num arco. A velocidade da câmera utilizada, 1000 quadros por segundo, foi considerada adequada pelos autores para a observação realizada. Esta técnica, com diferença na qualidade e capacidade dos equipamentos, vem sendo referenciada na literatura por "shadowgraphy", "laser back-lighting" (Waszink & Piena, 1986; Subramanian et al, 1998) ou "shadowgrafia" (Scotti 2000; Balsamo et al, 2000) e a chamaremos aqui de perfilografia. Em seu estudo sobre transferência metálica, Rhee & Kannatey-Asibu (1992) utilizaram diversos gases de proteção, com diferentes proporções de argônio, gás-carbônico e hélio, soldando aço-carbono com eletrodo de 1,6 mm de diâmetro a diferentes comprimentos de eletrodo percorridos por corrente. Seus resultados indicam que a menor corrente de transição ocorre à mínima proporção de CO₂ no argônio, fato que foi atribuído à menor tensão superficial na ponta do eletrodo, ocorrida com a utilização desta mistura, ou seja, segundo esses autores, quanto menos CO₂, menor a tensão superficial da gota à ponta do eletrodo. O efeito da utilização de

diversos gases de proteção, bem como da extensão de eletrodo percorrida por corrente são mostrados na Figura 2.16 e na Figura 2.17, respectivamente. Observa-se mudança nas correntes de transição e na frequência de destacamento das gotas para o modo goticular, o que também foi observado posteriormente por Scotti (2000) para outros gases de proteção e eletrodo de aço inoxidável. Ainda neste trabalho (Rhee & Kannatey-Asibu, 1992), os autores consideraram muito difícil medir, através das imagens obtidas com a perfilografia, o diâmetro das gotas. Então, determinou-se o diâmetro das gotas indiretamente, através da medida da frequência de destacamento e da velocidade de alimentação do arame. Para a determinação da velocidade e aceleração das gotas foi utilizado um localizador cartesiano de objetos nas imagens. Os autores consideraram muito difícil levantar as curvas posição *versus* tempo para soldagens com arcos curtos, ou quando usaram hélio ou CO₂ como gás de proteção; no caso do comprimento de arco, pela pequena quantidade de vezes que se observava a gota em sua trajetória, e no caso destes gases de proteção, porque houve grande instabilidade no movimento axial das gotas em transferência. Curvas de posição *versus* tempo para gotas, após o destacamento, em soldagens com argônio+5%CO₂ em diferentes correntes são mostradas na Figura 2.18. A aceleração das gotas foi obtida através da curva de ajuste dos pontos, a qual foi assumida como sendo de segundo grau através do método dos mínimos quadrados. Hu & Tsai (2007b) também determinaram perfis para o deslocamento das gotas, só que em modelagem numérica, e os comparam aos resultados de Jones et al (1998c), como mostrado na Figura 2.19. A aceleração média das gotas durante a trajetória também foi determinada analiticamente, através de um balanço simples das forças atuando na gota. A Figura 2.20 mostra os valores medidos e calculados para esta aceleração, onde se observa uma grande diferença entre o previsto e o medido pelos autores, demonstrando a fragilidade de sua determinação analítica da aceleração da gota durante sua trajetória.

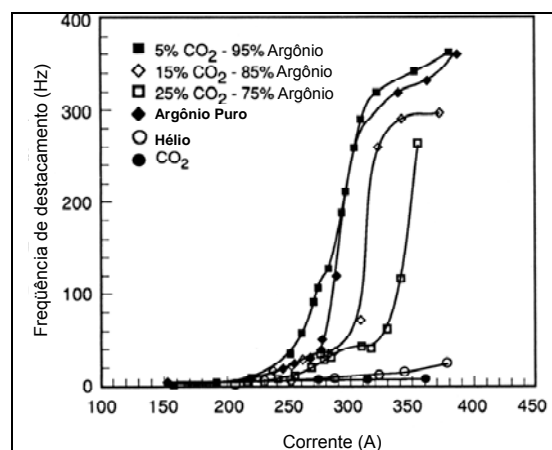


Figura 2.16 – Efeito da Corrente e do Gás de proteção sobre a frequência de destacamento das gotas (Rhee & Kannatey-Asibu, 1992)

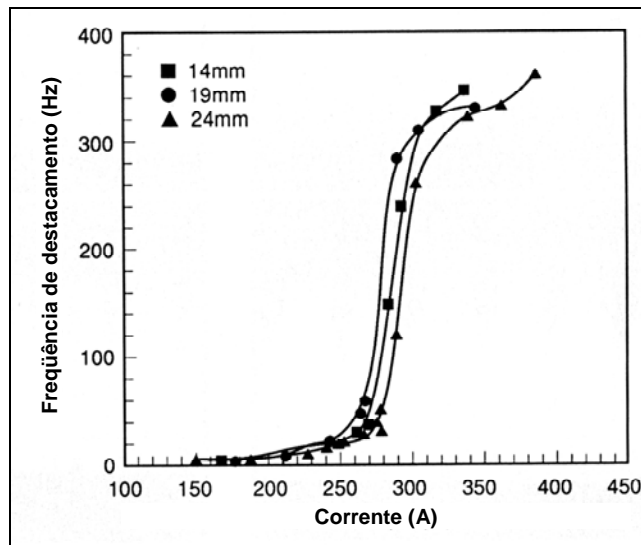


Figura 2.17 – Efeito da corrente e do comprimento energizado de eletrodo sobre a frequência de destacamento das gotas (Rhee & Kannatey-Asibu, 1992).

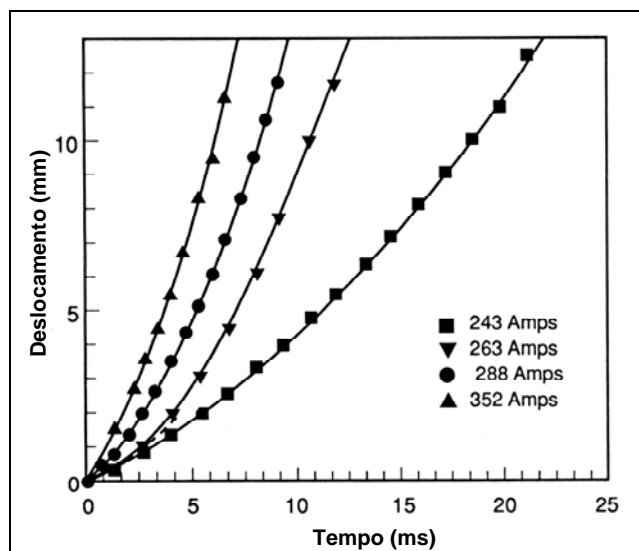


Figura 2.18 – Curvas posição da gota em função do tempo (Rhee & Kannatey-Asibu, 1992).

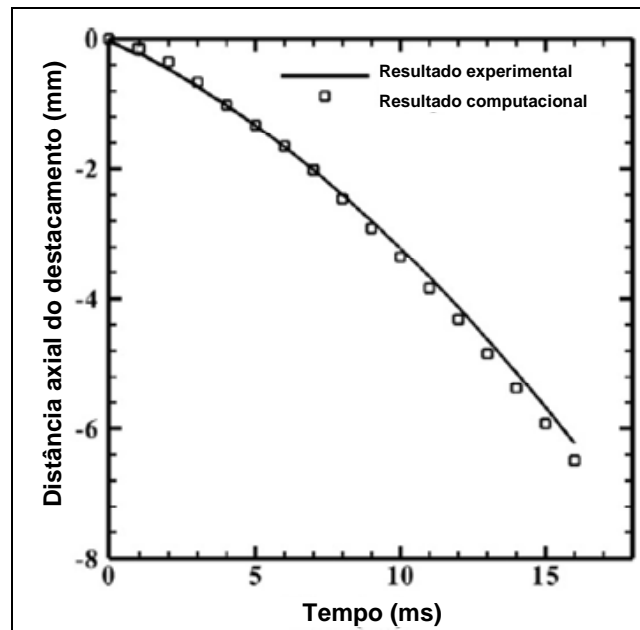


Figura 2.19 – Comparação dos resultados de Hu & Tsai (2007b) com os de Jones et al (1998).

Lin et al. (2001), por sua vez, utilizaram a técnica da perfilografia para determinar o tamanho das gotas. Devido à baixa taxa de filmagem utilizada (50 Hz) em comparação à frequência de transferência, que pode passar de 475 Hz (Scotti, 2000; Vilarinho & Scotti, 2000), um outro método teve de ser utilizado para determinar a velocidade das gotas em transferência. Duas fibras ópticas foram posicionadas verticalmente, a uma distância de 2 mm uma da outra, para detectar a sombra produzida pelas gotas caindo da ponta do eletrodo. Essas duas fibras ópticas terminavam em dois sensores fotodiodos, cujos sinais foram adquiridos e digitalizados com uma resolução de 50 kHz. A velocidade das gotas era então determinada pela medida do intervalo entre o acionamento dos sensores ópticos. Devido à limitação imposta pelo posicionamento das fibras, dado que as gotas atravessam o arco em mais de uma direção, a aplicabilidade desta metodologia só se dá, segundo o autor, na região mais próxima possível da ponta do eletrodo. Em outras palavras, utilizando este aparato, o autor conseguiu determinar apenas a velocidade das gotas após o destacamento, onde as gotas acionariam os sensores com o menor ângulo possível com a vertical. Assim, Lin et al (2001) afirmam ter medido a velocidade das gotas no destacamento. As velocidades obtidas são mostradas na Figura 2.21, para eletrodos da classe ER 70S-6, protegido por uma mistura de 3% O₂ + 5% CO + 92% Ar. Este trabalho ainda apresenta um cálculo da velocidade de destacamento das gotas baseado na teoria do balanço estático das forças (Waszinsk & Graat, 1983; Lancaster, 1984), que obteve boa aproximação dos dados experimentais, conforme a Figura 2.22.

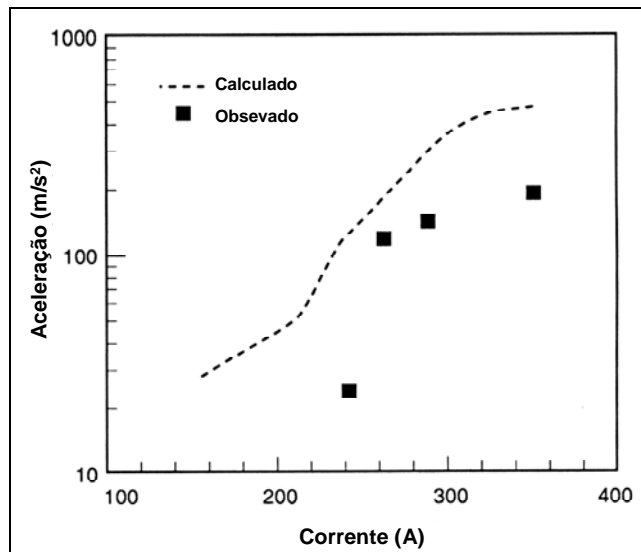


Figura 2.20 – Acelerações médias das gotas durante a trajetória apresentadas por Rhee & Kannatey-Asibu (1992).

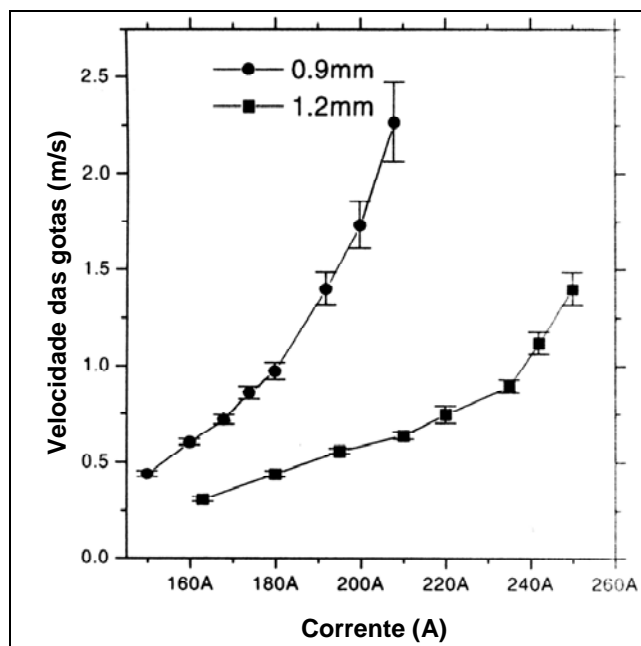


Figura 2.21 – Velocidade das gotas logo após o destacamento para os diâmetros de eletrodo 0,9 mm e 1,2 mm (Lin et al, 2001).

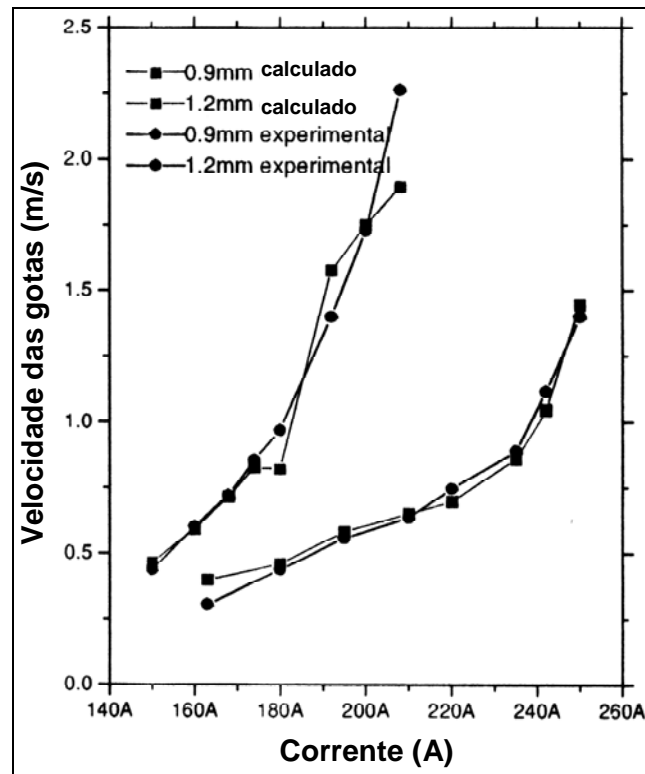


Figura 2.22 – Comparação entre os valores preditos e medidos da velocidade das gotas após o destacamento para os diâmetros de eletrodo 0,9 mm e 1,2 mm (Lin et al, 2001).

Jones et al (1998a), também fazendo uso de perfilografia, observaram a transferência metálica na soldagem MIG/MAG em corrente constante, de 180 a 480 A, com tensão de 27 a 35 V, utilizando eletrodo de aço com diâmetro 1,6 mm e gás Ar + 2% O₂. Os autores também determinaram analiticamente o valor das forças magnéticas atuando nas gotas durante a transferência metálica (Jones et al 1998b). Com o intuito de fomentar dados para um modelo dinâmico da transferência metálica (Jones et al, 1998c), também foi determinada a trajetória de duas gotas consecutivas em cada experimento até a corrente de 280 A, e apresentadas suas curvas de ajuste, tal como na Figura 2.23. A velocidade das gotas durante a trajetória foi apresentada através das curvas de primeira derivada das curvas de ajuste das suas posições, como mostra a Figura 2.24, a segunda derivada das curvas é apresentada na Figura 2.25, como aceleração total das gotas. Nota-se o aumento da aceleração das gotas a partir de 240 A, provavelmente devido à mudança no modo de transferência de globular para goticular. A aceleração devida ao arraste do plasma foi determinada como sendo a aceleração total das gotas subtraída da aceleração da gravidade. Os autores fizeram essas estimativas depois de considerar que fatores particulares do fluxo de plasma, como sua densidade e temperatura ao longo do arco, seriam muito difíceis de considerar, o que determinou que a aceleração do plasma fosse assim obtida e utilizada como componente do seu modelo para prever o destacamento das gotas.

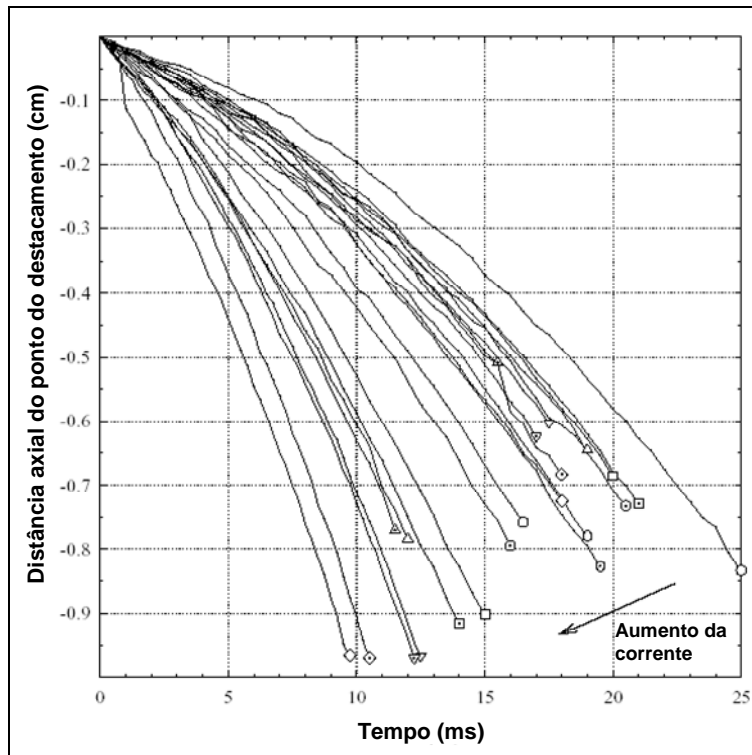


Figura 2.23 – Curvas ajustadas de trajetórias de gotas em transferência levantadas por Jones et al (1998c).

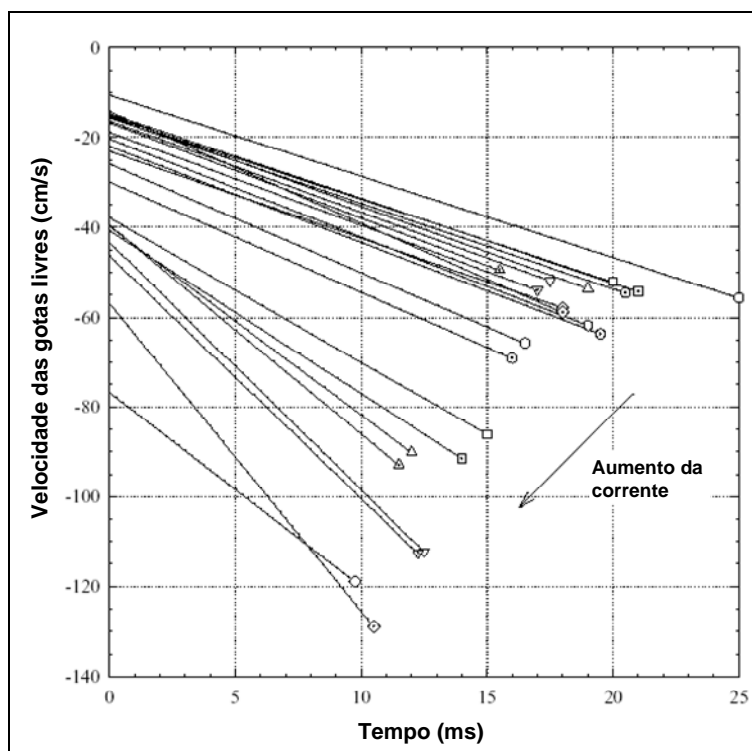


Figura 2.24 – Velocidades das gotas obtidas por Jones et al (1998c).

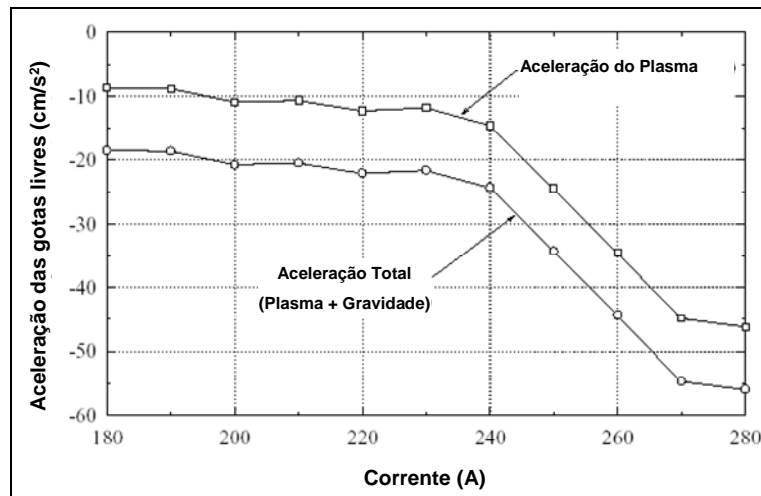


Figura 2.25 – Aceleração total das gotas durante a trajetória, e aceleração devida ao jato de plasma, obtidas por Jones et al (1998c).

2.3 Considerações finais

Apesar desses avanços em direção ao conhecimento cinemático e dinâmico da transferência metálica e sua relação com o comportamento da penetração no MIG/MAG, ainda não há registros da medição de alguns parâmetros cinemáticos da gota metálica, tais como velocidade de chegada à poça e dinâmicos, como o momentum, embora existam ferramentas para estimá-las e medi-las, tal como o PIV de Fronh & Roth (2000). Em alguns testes preliminares já publicados deste trabalho (Rodrigues et al, 2004), avaliou-se experimentalmente e aprovou-se uma dessas ferramentas, através do estudo da influência do comprimento do arco de soldagem sobre essas características cinemáticas citadas acima. Tal ferramenta consiste na metodologia a ser apresentada no Capítulo 3.

Como também se viu, vários modelos têm sido desenvolvidos, mas, devido às suas diversas limitações e simplificações, ainda se faz importante e necessária uma verificação experimental. Assim, pretende-se avaliar o efeito de algumas variáveis dos processos de soldagem de interesse científico, como o modo de transferência, a corrente de soldagem, a polaridade do eletrodo e o comprimento de arco, e de interesse mais direto da indústria, como por exemplo, o tipo de gás de proteção, sobre o comportamento das características cinemáticas das gotas em transferência, e o efeito destas características cinemáticas e da quantidade de movimento das gotas no perfil do cordão de solda, contribuindo dessa forma para o conhecimento da transferência metálica em soldagem.

Capítulo 3

3. Metodologia e Procedimento Experimental

Em resumo, o objetivo do trabalho é avaliar o efeito do modo de transferência, da corrente de soldagem e do comprimento de arco, para diferentes gases de proteção, composição do arame, e polaridade, sobre a Quantidade de Movimento efetiva das gotas e, conseqüentemente, sobre o perfil do cordão de solda. Assim, do ponto de vista metodológico, para atingir esse objetivo foram planejados experimentos que garantissem comparações entre cordões sob o efeito interativo da corrente e comprimento de arco, mas sob uma mesma quantidade de material depositado por comprimento de solda (que também aproxima para um mesmo calor imposto). Ao variar a corrente, estaria também se variando o modo de transferência, enquanto ao manter concomitantemente a mesma quantidade de material depositado por comprimento de solda (e aproximadamente o mesmo calor imposto, estar-se-ia tentando minimizar o efeito dos outros parâmetros governantes na formação do cordão e isolar o efeito da Quantidade de Movimento das gotas impingindo sobre a poça nessa formação. Entretanto, ainda existia o problema da velocidade de alimentação de arame ter de ser constante para cada corrente, já que era de se esperar que a velocidade inicial da gota afetasse a Quantidade de Movimento. Por isto, procurou-se também uma metodologia experimental que permitisse manter para cada valor de corrente a mesma velocidade de alimentação.

Além da regulação dos parâmetros, a metodologia para atingir os objetivos passa pela caracterização (geométrica e cinemática) das gotas em transferência. Conhecendo a geometria (conseqüentemente a massa) e as velocidades das gotas ao impingir sobre a poça foi possível determinar a principal característica dinâmica das gotas que poderia influenciar a formação do cordão, a saber, a Quantidade de Movimento. Finalmente, procurou-se a correlação entre a Quantidade de Movimento e a geometria dos cordões, obtidas em cada experimento. Adicionalmente, pode-se aplicar a metodologia que será descrita em um outro material, com propriedades bem particulares, como o alumínio, ou utilizando-se diferentes composições de gás de proteção, o que modificaria as características do arco de soldagem e também em polaridade direta, avaliando-se então o efeito da natureza da corrente.

Neste trabalho vai se procurar fazer uma correlação entre os fatores de entrada do processo (nível de corrente, comprimento de arco, material do eletrodo, gás de proteção e polaridade) e a geometria da solda (principalmente a penetração e área fundida). Mas como estes fatores de entrada afetam as características cinemáticas (velocidade e aceleração) e

dinâmicas (quantidade de movimento efetiva) resultantes, também se procurará uma relação entre os fatores de entrada e essas características assim como entre essas características e a geometria do cordão. Esta abordagem visa, portanto, poder revelar o efeito das características cinemáticas e dinâmicas com aspectos da formação do cordão (objetivo deste estudo) apesar dos fatores de entrada, as características cinemáticas e dinâmicas e a geometria serem inter-relacionadas.

3.1 Determinação dos parâmetros para soldar com diferentes comprimentos de arco e valores de corrente

O primeiro alvo do procedimento experimental foi o de se conseguir diferentes comprimentos de arco para uma mesma corrente de soldagem. Para se trabalhar com valores distintos de comprimento de arco para uma dada corrente de soldagem, pode-se usar o equipamento de soldagem no modo tensão constante, variar a regulagem da tensão de referência (U_{REF}) e ajustar a corrente pelo aumento ou redução da distância-bico-de-contato-peça (DBCP) ou pela variação da velocidade de alimentação do arame (V_A). Um exemplo dessa adequação é mostrado com auxílio da Figura 3.1, onde o ponto de trabalho inicial é representado por A (I_1, U_1) e U_1 significa uma faixa de tensão, cuja amplitude depende da inclinação da característica estática da fonte (CEF). Ao se regular somente o ajuste da U_{REF} , ou seja, mudando a CEF de CEF_1 para CEF_2 , o ponto de trabalho, neste exemplo, muda para B (I_2, U_2). Este ponto corresponde a um maior comprimento do arco (e um menor comprimento de eletrodo, para a mesma DBCP e V_A), mas a corrente de soldagem vai de I_1 para I_2 .

Entretanto, o que se deseja é manter a mesma corrente de soldagem, ou seja, que o ponto de trabalho seja o ponto C (I_1, U_2). Essa operação teria de ser feita por uma das duas maneiras citadas (reduzindo-se V_A ou aumentando-se a DBCP), justificadas analiticamente pela equação do consumo de arame-eletrodo na soldagem MIG/MAG (Equação 3.1):

$$C = \alpha I + \beta \rho l^2 \quad (3.1),$$

onde “C” é o consumo, “I” é a intensidade de corrente, “ ρ ” é a resistividade elétrica do arame, “ l ” é o comprimento energizado de arame e “ α ” e “ β ” são constantes dependentes dos consumíveis (diâmetro e composição), do gás de proteção e do material da peça de trabalho.

O aumento do comprimento do arco no ponto B justifica-se pelo aumento da corrente (de I_1 para I_2) e pela redução do comprimento “ l ”, já que o consumo, representado pela V_A , se mantém o mesmo. Considerando que a dependência do consumo em relação à corrente é quadrática e em relação ao comprimento do eletrodo é linear, pode-se mostrar que I_2

não é muito maior do que I_1 . Mas para manter a mesma corrente da situação A, uma primeira alternativa seria ajustar V_A para um menor valor, permitindo que a corrente diminuísse, já que haveria redução do consumo de eletrodo. O novo ponto trabalho seria o ponto C, que tem um arco um pouco maior do que em A e em B, respectivamente. Uma outra alternativa seria repor a redução do comprimento " l " de eletrodo energizado no ponto B através do aumento da distância-bico-de-contato-peça (DBCP), mudando também o ponto de trabalho para C. Esta segunda maneira de correção permite que a corrente diminua sem afetar o consumo, já que aumenta-se também o comprimento do eletrodo.

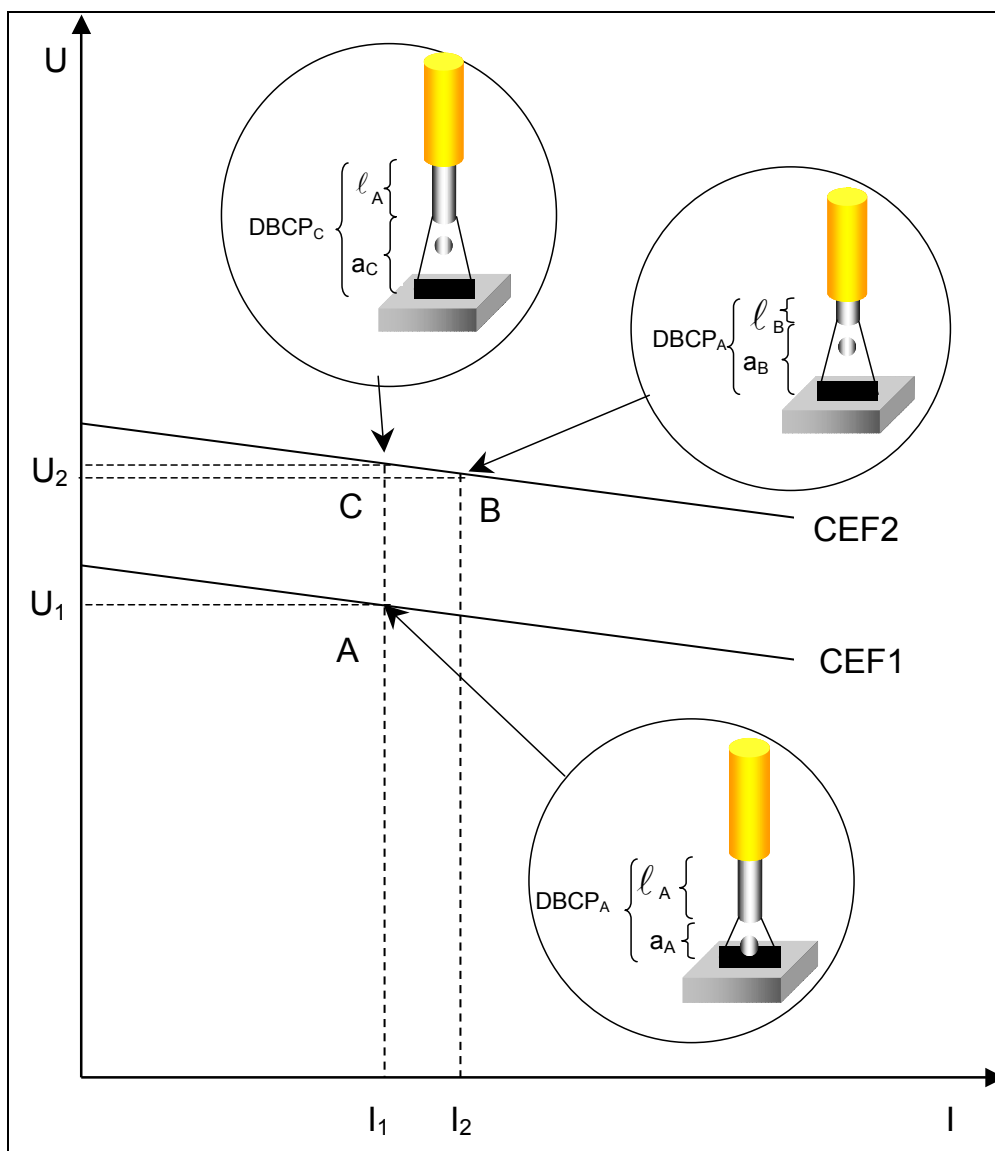


Figura 3.1 – Representação esquemática da adequação dos parâmetros de soldagem.

Como não é fixa a proporção direta entre U_{REF} e o comprimento do arco de soldagem, torna-se necessário realizar vários testes para a determinação da DBCP ou da nova V_A que propiciará a ocorrência do ponto de trabalho C. Mesmo assim, ter-se-iam valores de corrente em torno do valor desejado, já que em fontes de tensão constante a corrente flutua conforme a carga e transientes.

Devido a esta dificuldade, pensou-se em alterar o comprimento do arco de outra forma. Como a fonte de soldagem utilizada permite trabalhar no modo corrente constante e sem habilitar o controle do comprimento do arco, pode-se regular a corrente de soldagem (I) para o valor desejado e ajustar a velocidade de alimentação do arame (V_A), de forma independente, até atingir o comprimento de arco também desejado (por exemplo, o ponto A). Porém, como o objetivo é manter a mesma velocidade de alimentação para uma dada corrente, a variação do comprimento do arco poderia ainda ser feita pela variação da DBCP. Assim, pode-se mudar da situação "A" diretamente para a "C" (Figura 3.1) apenas com o aumento da DBCP, sem passar pelo ponto B, mantendo-se a mesma corrente e velocidade de alimentação (manteria-se as velocidades iniciais das gotas as mesmas). Se o desejado fosse manter a mesma corrente e DBCP, passar-se-ia da situação "A" diretamente para a "C" pelo ajuste da velocidade de alimentação (poder-se-ia estudar o efeito das velocidades iniciais das gotas). Salienta-se que os pontos A e C agora fazem parte de uma curva de característica estática de corrente constante, não mais de tensão constante como na Figura 3.1.

Este procedimento foi repetido em três níveis de corrente: um deles ligeiramente abaixo da corrente de transição, tendo transferência metálica tipo globular estável; um nível ligeiramente acima da corrente de transição, este com transferência goticular estável; e por último, em um nível de corrente que forneça transferência metálica goticular estável com um pequeno início de alongamento. Isso permitiu comparar o modo globular e o goticular, bem como duas situações em transferência goticular. Paralelamente a isso, a velocidade de soldagem foi mantida proporcional à velocidade de alimentação do arame, para que se mantivesse constante a área adicionada do cordão, bem como aproximadamente a energia imposta de cada solda.

3.2 Caracterização da transferência metálica

A caracterização da transferência é feita através das características geométricas (diâmetro das gotas, comprimento do arco) e cinemáticas (frequência de destacamento e perfil de velocidades das gotas). A principal ferramenta para esta caracterização é o sistema de filmagem em alta velocidade. Adicionalmente, se utilizaram softwares dedicados para o tratamento adequado dos dados levantados nas filmagens.

3.2.1. Filmagem em alta velocidade das transferências metálicas

Para se registrar as gotas em transferência e, assim, poder se caracterizar geometricamente e cinematicamente as gotas das soldagens para aplicar no presente estudo, utilizaram-se um canhão laser, um sistema óptico e uma câmera para filmagens em alta velocidade (técnica da “shadowgrafia”, Vilarinho et al, 2000, ultimamente sendo referenciada como Perfilografia). O sistema citado é mostrado na Figura 3.2. O sistema óptico entre o canhão de laser e o arco consiste em um conjunto de filtros de densidade neutra (ND003 a ND01), para reduzir levemente a intensidade do laser antes do arco, uma lente divergente, para aumentar o diâmetro do feixe de Laser (He-Ne, 632,2 nm), e uma plano-convexa, para torná-lo novamente colimado. O sistema óptico entre o arco e a câmera consiste em outro filtro neutro (ND10 a ND15) e um filtro passa-banda, cuja utilidade deste último é filtrar da melhor maneira possível os raios provenientes do arco voltaico, deixando passar apenas a luz do Laser e os raios cujo comprimento de onda é da magnitude do mesmo. Utiliza-se uma objetiva com zoom para focar o eletrodo e a peça. Utilizou-se a velocidade de filmagem de 2000 quadros por segundo, com obturação mecânica, e em cada quadro usou-se obturação eletrônica a 1/24000 (possibilitando reduzir distorções devidas ao movimento dos elementos filmados, no caso, as gotas). Essas configurações permitem imagens com resolução de 252 x 188 pixels (h x v), equivalendo a 96 dpi. As filmagens são gravadas em uma seqüência de imagens monocromáticas a uma freqüência de 2000 quadros por segundo, no formato TIFF (Tagged Image File Format), o que permite posterior tratamento das mesmas.

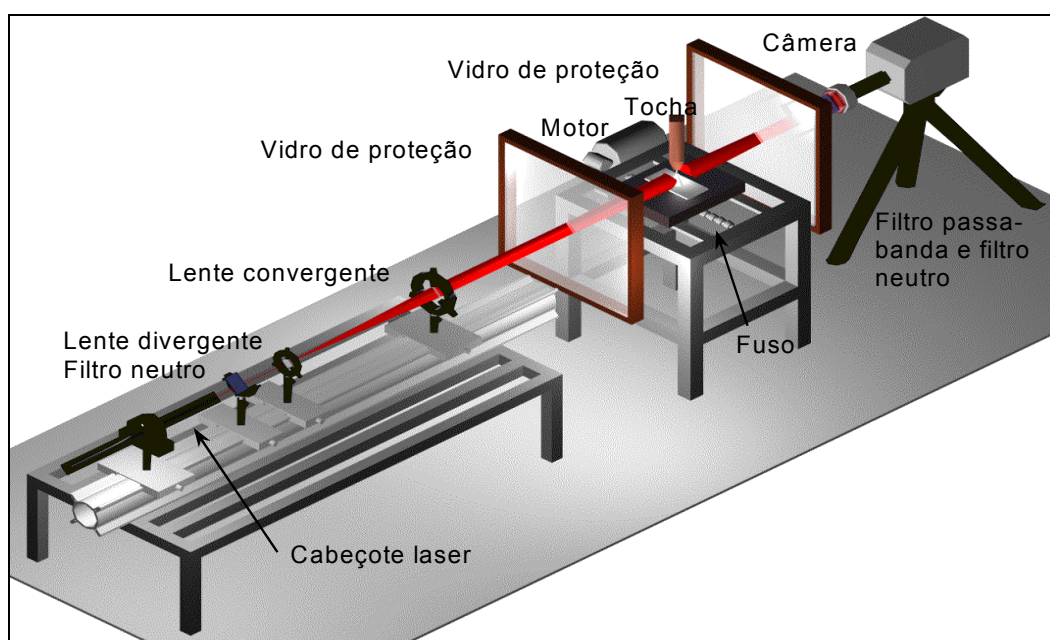


Figura 3.2 – Técnica de filmagem Perfilografia. (Vilarinho, 2000)

Foi utilizado um programa específico, denominado “Vídeo Analisador de Imagens de Transferência Metálica em Soldagem” (Maia et al, 2002 e Maia et al 2003), para quantificar características da transferência metálica. Esse programa, feito na plataforma LabView®, permite a caracterização das transferências metálicas (sobretudo quanto aos parâmetros frequência de destacamento e diâmetro das gotas) e dos comprimentos do eletrodo e do arco de soldagem. A tela de apresentação e o ambiente de análise do programa são ilustrados nas Figura 3.3 e Figura 3.4, respectivamente. A amostra analisada utilizando o programa “Vídeo Analisador” compreende todos os quadros de um filme obtido através da técnica da Perfilografia, previamente citada, totalizando 1,3 s de soldagem a 2000 quadros por segundo, ou seja 2600 imagens de cada experimento.

Um aspecto importante deste aplicativo analisador de imagens é o critério utilizado para a determinação do comprimento do arco. Este critério foi definido por Ponomarev et al (2002) e Costa (2003), consistindo em:

- Para transferência globular assume-se que a gota atinge um tamanho maior do que 1,2 vezes o diâmetro do eletrodo. Neste caso, o comprimento do arco deve ser medido a partir de uma distância igual a 0,25 vezes o diâmetro do eletrodo acima da base da gota conforme mostrado na Figura 3.5 (a). Antes de alcançar o tamanho de gota maior do que 1,2 vezes o diâmetro do eletrodo o arco deve ser medido pelo critério a seguir, adotado para a transferência goticular;
- Na transferência goticular, o tamanho da gota é assumido como sendo menor ou igual a 1,2 vezes o diâmetro do eletrodo. Neste caso, o arco é medido a partir de uma distância igual a 0,5 vezes o diâmetro do eletrodo acima da base da gota, conforme mostrado pela Figura 3.5 (b).
- Para a transferência metálica do tipo goticular com alongamento, o comprimento do arco deve ser tomado a partir de uma distância igual a 1,5 vezes o diâmetro do eletrodo abaixo do início do afinamento, conforme está ilustrado na Figura 3.5 (c). A definição de 1,5 vezes o diâmetro do eletrodo justifica-se pelo fato de parte do alongamento do eletrodo acontecer por condução de calor e não pela ação direta do arco.



Figura 3.3 – Tela de apresentação do Vídeo Analisador da transferência metálica.

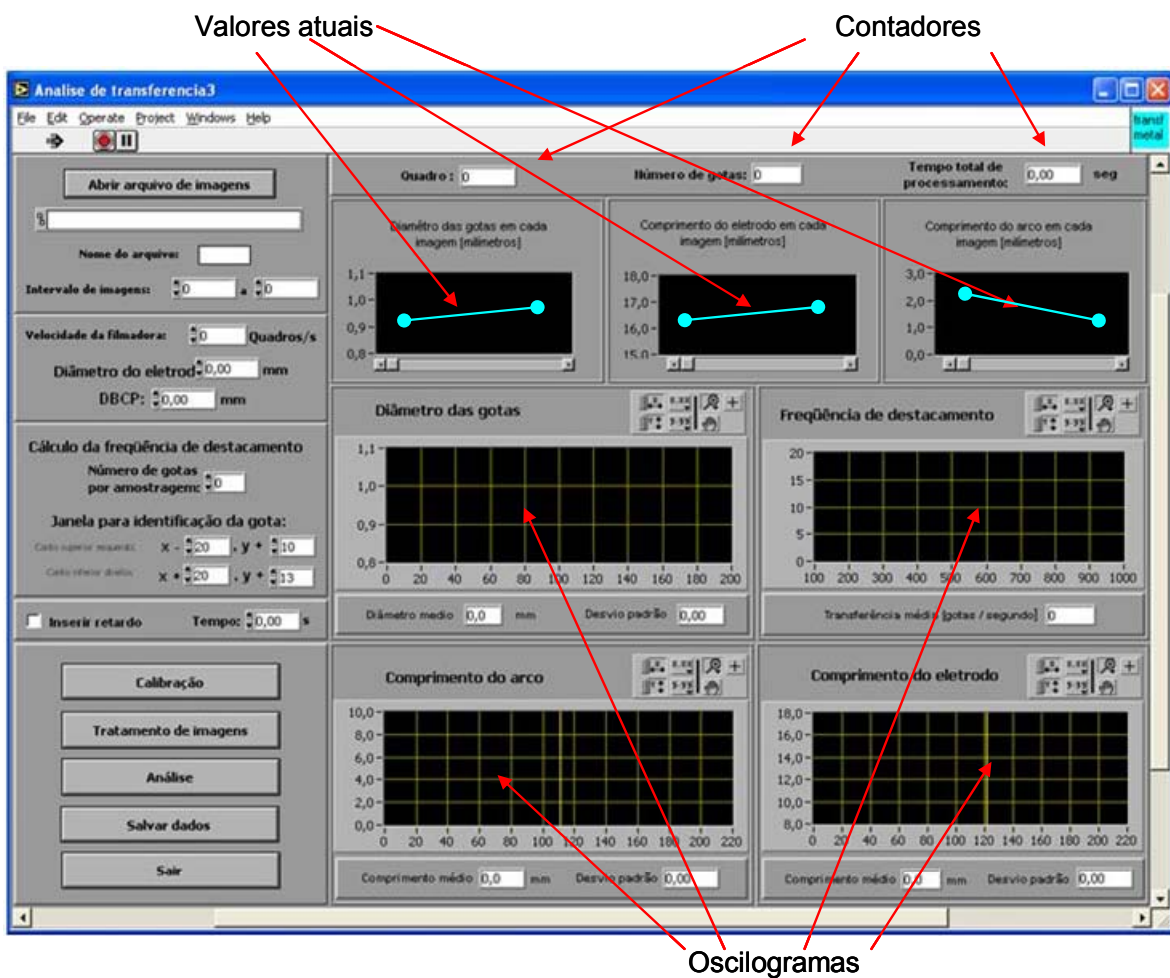


Figura 3.4 – Ambiente de análise do programa.

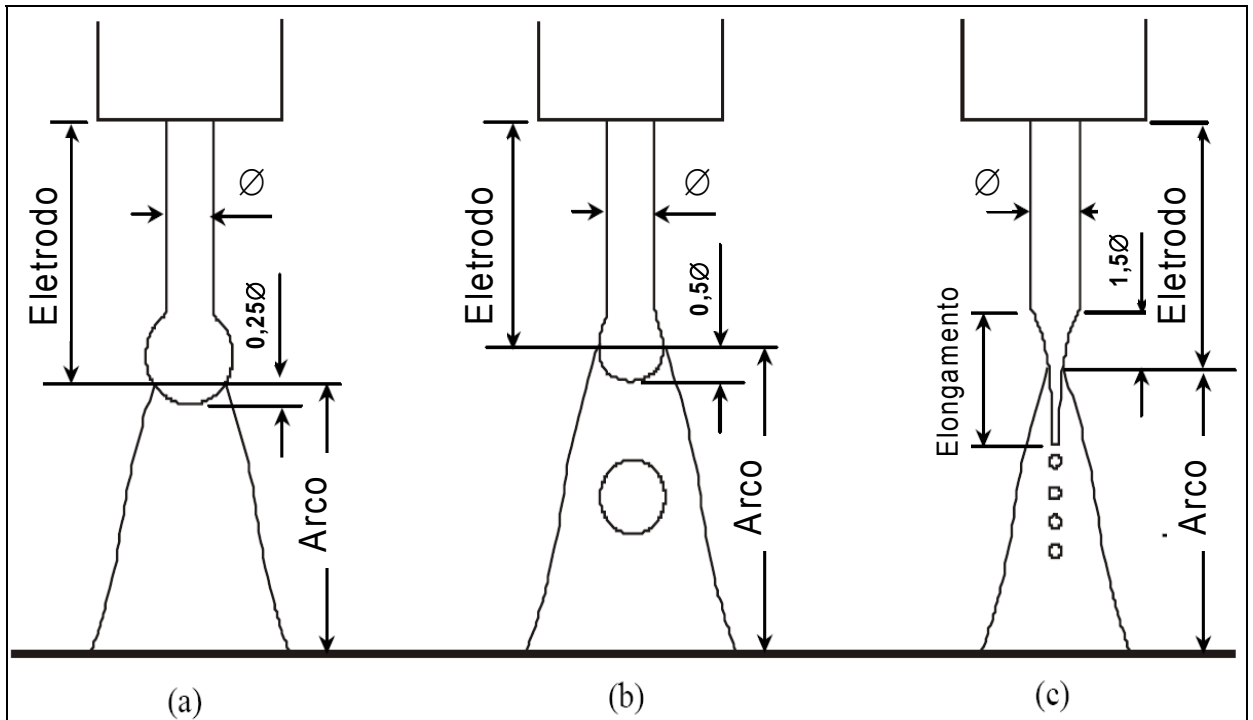


Figura 3.5 – Critérios para medição do comprimento do arco em soldagens com transferências metálicas por vôo livre. (adaptado de Maia, 2001).

3.2.2. Medição das características cinemáticas das gotas em transferência

Esta medição foi realizada utilizando um outro software de análise de imagens (Optimas® MA® 1.4), agora comercial. Trata-se de um programa com recursos para análise cinemática de elementos nas imagens, os quais são definidos pelo usuário. Sua destinação primária é a análise de “crash-tests” para o meio automobilístico, porém, perceberam-se diversas possíveis aplicações do mesmo, sendo uma delas na análise das filmagens em alta velocidade da transferência metálica.

Sua utilização é baseada na localização de “alvos” numa seqüência de imagens TIFF, como mostrado na Figura 3.6. O programa permite a localização de até 3 “alvos” por vez, ou seja, caracterizar 3 elementos individualmente (no caso de transferência metálica será usado apenas um alvo de cada vez). Desta forma, após uma seqüência de quadros, o programa é capaz de calcular e fornecer características cinemáticas de cada elemento (alvo), como a posição espacial e a velocidade e aceleração instantâneas ao longo do tempo. Os dados fornecidos pelo programa (vetores) são salvos em tabelas que podem ser tratadas em planilhas eletrônicas comerciais.

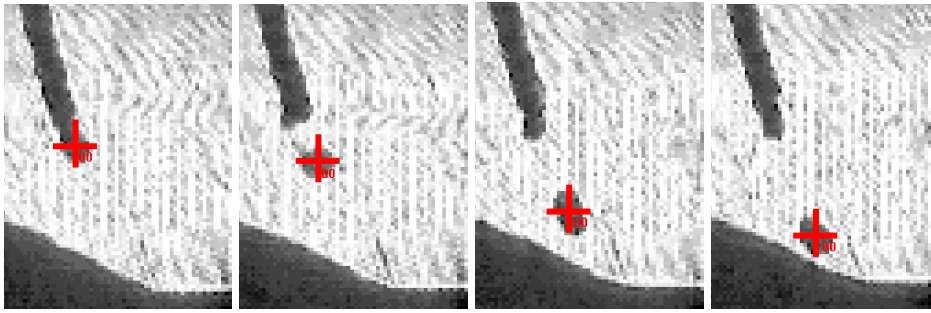


Figura 3.6 – Sequência de localização de alvos nas imagens de transferência metálica, com a definição, na gota em transferência, de um alvo por quadro.

Deve-se chamar atenção para o fato de que o programa calcula a derivada primeira e segunda entre dois pontos subsequentes (sem filtragem) para se determinar as velocidades e acelerações instantâneas, o que causa uma grande oscilação dos valores, frente às prováveis características caóticas do movimento das gotas e erros experimentais. Por isto, decidiu-se, no presente estudo, se utilizar do vetor posição produzido pelo programa para gerar curvas de ajuste relativas aos pontos das coordenadas posição *versus* tempo, como mostrado na Figura 3.7. Estipulou-se como de interesse para este estudo apenas os valores da velocidade instantânea de chegada (obtidos através dos valores dos dois últimos pontos obtidos com o programa), referenciado daqui para frente por V_{CHE} , e a aceleração média da gota durante a trajetória (coeficiente angular da primeira derivada da equação da curva de ajuste posição *versus* tempo), referenciada daqui para frente por A_{MED} . O ponto inicial do levantamento das trajetórias foi definido como aquele imediatamente após o destacamento.

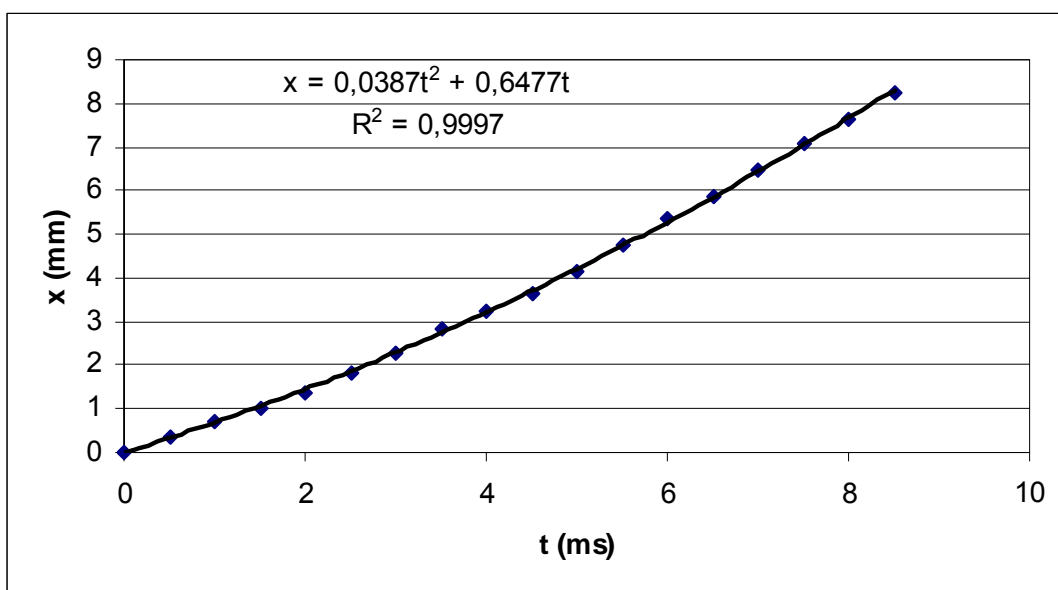


Figura 3.7 – Curva típica posição *versus* tempo de uma gota em transferência.

3.3 Determinação da característica dinâmica das gotas em transferência

Torna-se importante, antes de qualquer análise sobre o efeito dinâmico das gotas em transferência sobre a formação do cordão, relembrar alguns conceitos. Momentum, ou Quantidade de Movimento, pode ser definido como massa em movimento. Então, se um objeto se move, ele tem Quantidade de Movimento, a qual é dada pelo produto de sua massa pela sua velocidade. Quando um objeto, cuja massa permanece constante, sofre uma mudança em sua Quantidade de Movimento é por que sofreu a ação de uma força externa por um determinado tempo, ou seja, há mudança na velocidade do objeto. Em física, a quantidade Força x tempo é conhecida como Impulso. Desde que o produto massa x velocidade é a Quantidade de Movimento, o produto massa x variação de velocidade representa a mudança da Quantidade de Movimento, ou seja, Impulso é igual à mudança na Quantidade de Movimento, tal como na Equação 3.2:

$$Q = \rho \pi \frac{d^3}{6} * V_{CHE} [\text{kg} * \text{m} * \text{s}^{-1}] \quad (3.2),$$

onde “Q” é a Quantidade de Movimento, “ ρ ” a densidade, “d” o diâmetro e “ V_{CHE} ” a velocidade média de chegada das gotas à poça de fusão, em unidades do SI (Reis, 2006).

Uma transferência metálica com gotas de grandes dimensões poderá ter uma grande Quantidade de Movimento, mas não necessariamente vai exercer uma ação significativa sobre a penetração do cordão. Acredita-se (Scotti & Murray, 1999) que o importante é o número de vezes que a Quantidade de Movimento de cada gota é transferida para a poça em um determinado intervalo de tempo. Assim, no presente trabalho assumiu-se que uma melhor representação física da ação das gotas sobre a poça (movimentação de massa intermitente) seria dada pelo produto da Quantidade de Movimento pela freqüência com que as gotas chegam à poça de fusão, o que foi denominado de agora em diante de Taxa de Quantidade de Movimento (T), como expresso pela Equação 3.3:

$$T = Q * f [\text{N}] \quad (3.3),$$

onde “T” é a Taxa de Quantidade de Movimento e “f” a freqüência de destacamento. Se for dividida essa Taxa de Quantidade de Movimento pela velocidade de soldagem (V_s), chega-se ao parâmetro que aqui foi denominado de Quantidade de Movimento Efetiva (Q_e), das gotas que impingem na poça num dado comprimento de solda, como é demonstrado pela Equação 3.4.

$$Q_e = \frac{T}{V_s} [\text{kg} * \text{s}^{-1}] \quad (3.4),$$

Ostenta-se neste trabalho que a Quantidade de Movimento Efetiva das gotas, ainda inédita na literatura, ao contrário das referências comumente feitas ao “momentum” ou “impulso”, é que provavelmente traduz a capacidade destas gotas contribuírem para a penetração (e outros parâmetros geométricos do cordão). Observa-se que a unidade de “ Q_e ” no SI é kg/s, considerando massas em kg, dimensões em m, velocidades em m/s e frequências em Hz (1/s).

3.4 Medição das características geométricas das soldas

As soldas realizadas segundo a metodologia descrita no item 3.1, cujas gotas foram filmadas, caracterizadas e medidas, foram seccionados transversalmente em três regiões diferentes. As seções transversais foram preparadas para ataque macrográfico (Nital 5% para aço e reagente de Tuckers para alumínio) e digitalizadas por um sistema de tratamento de imagens acoplado a um microcomputador (programa GlobaLAB® ImageViewer®). Os parâmetros geométricos medidos foram o reforço, a largura e a penetração, bem como as áreas fundida e adicionada, conforme a Figura 3.8.

Os cordões de solda realizados têm dimensões aproximadas de 25 a 27 cm, e foram avaliados em três seções, obtidas com cortes sempre no ultimo quarto do corpo de prova, esperando avaliar sempre as mesmas regiões dos cordões, soldadas em condições adequadas de estabilidade do processo e aquecimento da chapa de teste, mesa, tocha e do bico de contato.

Pode-se presumir ser uma tarefa trivial a medição das características geométricas utilizando o sistema descrito acima, mas o mesmo contém algumas fontes de erro que merecem ser citadas, tal como algum eventual erro de calibração. Neste caso, procurou-se realizar a calibração em duas direções utilizando o maior comprimento possível na malha de calibração. Mas este seria um erro sistemático, que não refletiria nas tendências dos resultados, mas apenas provocaria um “offset” nos valores para mais ou para menos. Um outro tipo de erro, este associado ao operador do sistema de medição, seria na marcação das linhas a serem medidas e na delimitação das áreas. Ainda se poderiam somar estes dois tipos de erro citados com a variação na posição de corte das amostras, que pode ocorrer tanto em um pico como em um vale das costelas do cordão de solda, e também no momento de realizar o polimento pode-se eventualmente arredondar as amostras, o que poderia também

comprometer o resultado, especialmente o de área adicionada. Sabendo disso, é razoável esperar encontrar alguma variância nas medidas de cada experimento, associada aos diversos possíveis tipos de erros citados.

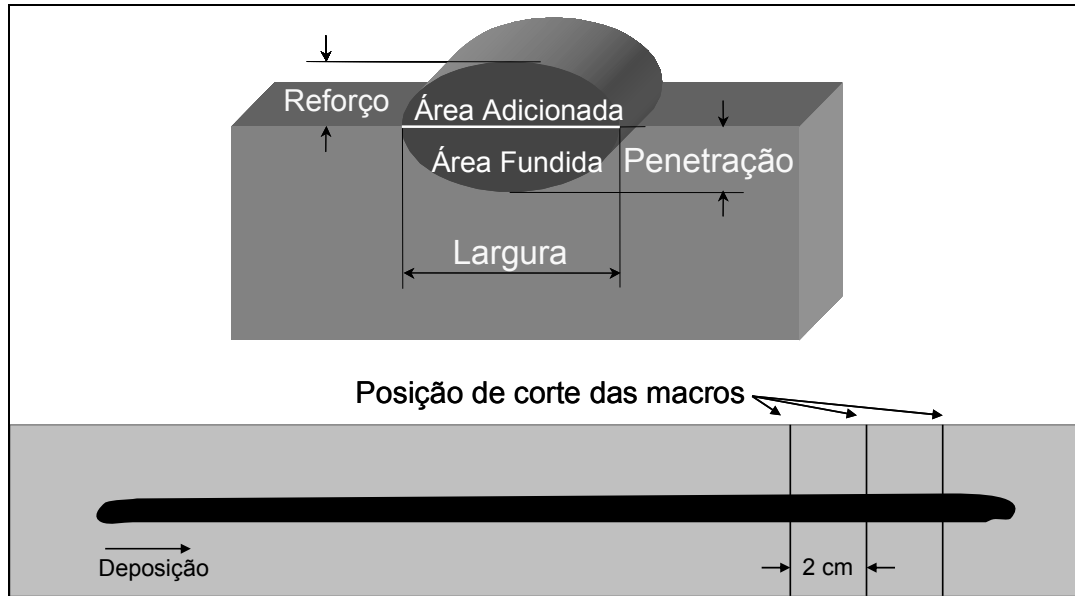


Figura 3.8 – Características Geométricas do cordão de solda.

Capítulo 4

4. Avaliação do Sistema para Quantificar as Características Cinemáticas das Gotas

A idéia de mensurar automaticamente a transferência metálica tem acompanhado os pesquisadores do LAPROSOLDA/UFU, e de diversos outros centros de pesquisa, levando-os a desenvolver e aperfeiçoar sistemas cada vez mais complexos e avançados. Dentre estes sistemas de mensuração, destacam-se as rotinas “VideoAnalisador.vi” (Maia, 2001), na plataforma LabView, e “Optimas MA 1.4”[®], na plataforma Optimas CO. Ao passo em que são incrementadas as ferramentas, se gera a demanda pela sua avaliação. Um exemplo criterioso de avaliação, baseada na comparação entre as medidas realizadas pelos pesquisadores do LAPROSOLDA/UFU e as medidas realizadas pelo “VideoAnalisador.vi”, já foi realizada, com resultados satisfatórios (Maia et al, 2003). Em um outro estudo, foi inserida a utilização do programa “Optimas MA 1.4”[®] para a caracterização cinemática da transferência metálica, cuja avaliação se faz presente neste capítulo e já fora divulgada (Rodrigues et al, 2004). Adicionalmente, aproveitou-se os experimentos realizados para avaliar o software “Optimas MA 1.4”[®] para se fazer uma avaliação diferente do “VideoAnalisador.vi”, que também é aqui apresentada.

Esse tipo de avaliação se justifica pelo fato da confiabilidade dos resultados fornecidos por estas ferramentas ser de extrema importância. O conhecimento do erro contido nesses procedimentos é necessário para reforçar as conclusões sobre os efeitos das variáveis envolvidas na transferência metálica. Para isso, realizou-se um experimento simples, mas bastante elucidativo, o qual posteriormente verificou-se também já haver sido utilizado com sucesso por outros pesquisadores (Lin et al, 2001). Esse experimento se baseia no uso de algumas esferas de dimensões conhecidas, como “falsas gotas”. Essas esferas foram soltas (utilizando um eletroímã) e atravessaram o feixe de laser, à frente da câmera (Figura 4.1), viajando num meio conhecido (atmosfera), sob a ação de uma aceleração conhecida (gravidade), simulando o fenômeno da transferência metálica. Aplicando-se a mesma técnica e aparelhos utilizados para visualizar e medir as gotas em transferência, levantaram-se curvas de posição *versus* tempo da queda livre dessas esferas. Obviamente, as condições de contorno deste experimento são bem melhor conhecidas do que no caso das gotas reais, que viajam no interior do fluxo de plasma da soldagem. Caso seja observada alguma dispersão nos resultados de uma mesma “falsa gota” e/ou entre “falsas gotas” com diferentes diâmetros, concluir-se-á que o erro é intrínseco à técnica e não ao fenômeno. Este experimento ainda pode dar outras importantes informações. Por exemplo, permite também verificar a precisão da

medida (dimensional e de forma) do diâmetro das gotas, que é realizada pelo programa “VideoAnalizador.vi”.

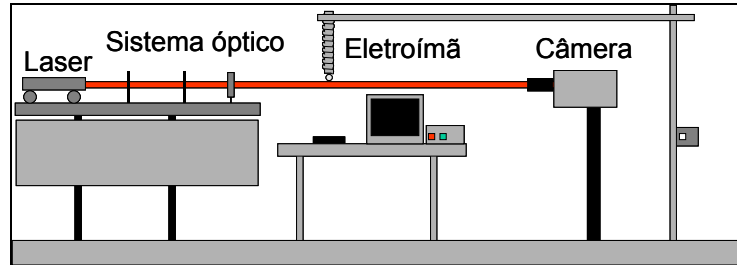


Figura 4.1 – Esquema da bancada utilizada para avaliar os erros de medida das gotas

4.1 Metodologia de avaliação

Os seguintes critérios foram utilizados para avaliar a acuidade dos métodos e processos citados no capítulo anterior:

- A aceleração obtida para cada “falsa gota” em comparação à aceleração da gravidade esperada;
- Os coeficientes de correlação das curvas posição x tempo das “falsas gotas”; e
- A medição via software do diâmetro de cada “falsa gota” em comparação ao valor real, para diferentes aumentos.

De posse das imagens das “falsas gotas” em queda, utilizou-se o programa "Optimas MA 1.4" para levantar os pontos da trajetória da esfera em queda livre. Repetiu-se esse experimento aplicando-se mais duas ampliações (zoom) diferentes para as imagens captadas. Comparando as filmagens da queda das esferas em diferentes aumentos, avalia-se se há influência do mesmo sobre as trajetórias obtidas.

As mesmas imagens citadas no parágrafo anterior foram aproveitadas para avaliar o programa “VideoAnalizador.vi”, determinando digitalmente o diâmetro das esferas utilizadas, e comparando-o com o diâmetro medido. Uma avaliação visual simples da esfericidade do elemento nas imagens permite avaliar se houve deformação dos objetos em movimento na filmagem com alta velocidade.

4.2 Resultados

De uma maneira geral, alguns erros já eram esperados, uma vez que o eletroímã construído no laboratório possui uma razoável inércia magnética, o que proporciona a ocorrência de campo magnético residual no momento de soltar as esferas. Este campo

residual, além do empuxo do ar, pode ser responsável por uma redução na aceleração inicial de queda das esferas, ou mesmo pelo seu não descolamento do eletroímã ao se desligar o mesmo. Alguns experimentos foram realizados com a liberação da esfera pela inversão do sentido da corrente nas espiras do eletroímã. Isso também pode ter acarretado uma aceleração inicial maior que a da gravidade. A Figura 4.2 apresenta exemplos de quadros das filmagens em dois dos aumentos utilizados.

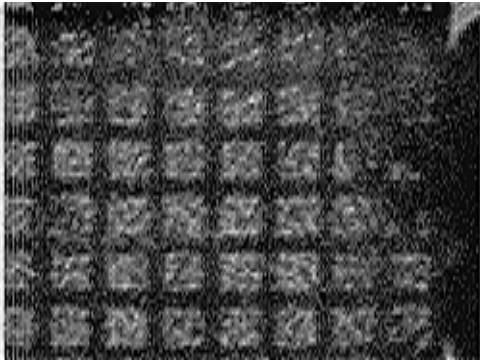
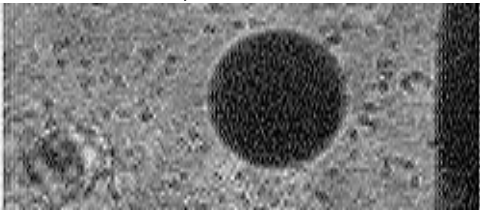
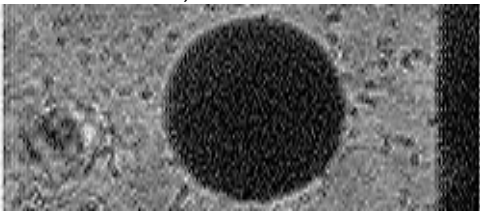
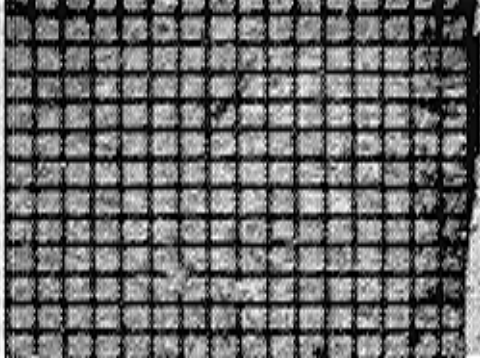

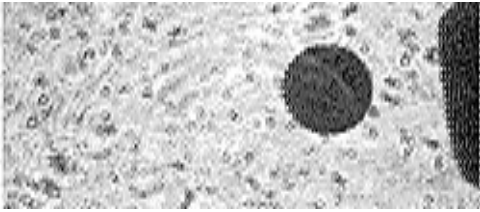
Calibração	Ø da "Falsa Gota" (pelo metroscópio)
Ampliação Grande (25 pixels/mm) 	2,3763 mm 
	3,1723 mm 
Ampliação média (14,3 pixels/mm) 	2,3763 mm 
	3,1723 mm 

Figura 4.2 – Ilustração de imagens usadas para medição dos diâmetros das "falsas gotas".

Em nenhuma das filmagens realizadas foi observado qualquer desvio de esfericidade dos elementos nas imagens. Considera-se que a velocidade de obturação utilizada, de 1/24000, é adequada a minimizar e até evitar deformações decorrentes do movimento dos elementos. Para um melhor efeito de comparação, as esferas utilizadas como "falsas gotas" foram medidas com um Metroscópio Horizontal de 0,2 μm de resolução, disponível no Laboratório de Metrologia da FEMEC/UFU. A Tabela 4.1 apresenta a média de

três medidas de cada esfera, realizadas no metroscópio, bem como o resultado de 100 medições feitas utilizando-se o “VideoAnalisador.vi”, com os respectivos desvios padrão (σ). Observa-se também, nessa tabela, que a diferença (Δ) apresentada entre as medidas do metroscópio e do “VideoAnalisador.Vi” manteve-se aproximadamente constante, com tendência a aumentar para maiores “falsas gotas”. Isso é provocado pelo pré-processamento das imagens que é feito para que as mesmas possam ser avaliadas pelo programa, além da distorção provocada pela utilização de lentes objetivas nas filmagens. Nestes experimentos também se detectou uma particularidade do programa “VideoAnalisador.vi”: quando da utilização de uma ampliação pequena (elementos menores nas imagens) o mesmo não detecta a existência das “falsas gotas”, o que conduz à recomendação de não utilizar ampliações pequenas nas filmagens a serem medidas pelo programa.

Tabela 4.1 – Medidas do diâmetro das esferas utilizadas em função do diâmetro nominal crescente e da ampliação da imagem.

Diâmetro Nominal medido pelo Metroscópio Horizontal (mm)	Diâmetro experimental medido pelo “VideoAnalisador.vi” (mm)								
	Maior Ampliação (25 pixels/mm)			Ampliação Média (14,5 pixels/mm)			Menor ampliação (12,5 pixels/mm)		
	Média	σ	Δ	Média	σ	Δ	Média	σ	Δ
0,7962 ($\sigma = 0,0022$)	0,70	0,01	0,10	0,60	0,01	0,20	-	-	-
1,3535 ($\sigma = 0,0784$)	1,30	0,01	0,05	1,30	0,02	0,05	-	-	-
1,9617 ($\sigma = 0,0263$)	1,90	0,01	0,06	1,90	0,03	0,06	-	-	-
2,3763 ($\sigma = 0,0024$)	2,10	0,09	0,38	2,20	0,03	0,28	2,20	0,03	0,28
3,1723 ($\sigma = 0,0012$)	3,10	0,11	0,07	3,00	0,22	0,17	3,10	0,03	0,07

Onde Δ é a diferença entre diâmetro nominal e diâmetro experimental

A aceleração da gravidade à altitude aproximada em que foram realizados os experimentos é de $9,7838163 \text{ m/s}^2$ (Soares, 2006). A Tabela 4.2 apresenta os valores medidos da aceleração da gravidade nas ampliações média e grande, bem como a diferença (Δ) entre estes valores e o valor real citado. A maior ampliação apresentou uma menor dispersão dos resultados, representada pelos desvios padrão. Mesmo com o fato do eletroímã utilizado não realizar, na maioria das vezes, lançamentos perfeitos, o desvio padrão de todas as medidas realizadas foi de apenas $0,44 \text{ m/s}^2$, revelando que, de uma maneira geral, a técnica apresenta bons resultados. A diferença entre a média global das medidas realizadas e o valor real foi de $0,17 \text{ m/s}^2$, ou aproximadamente 1,8% do valor obtido na literatura, indicando uma razoável aplicabilidade da técnica. Como este erro é do tipo sistemático, não aleatório, considera-se para a mensuração de acelerações da ordem das observadas em transferência metálica, que é

de aproximadamente 10 m/s^2 para transferência globular (Jones et al, 1998c) e de aproximadamente 100 a 200 m/s^2 para transferência goticular (Clark et al, 1989; Rhee & Kannatey-Asibu, 1992; Rodrigues et al, 2004) a técnica adequada.

Nas avaliações a seguir foi omitida a avaliação da menor ampliação, uma vez que não foi possível executar o passo anterior para esta ampliação. Optou-se então por avaliar os resultados obtidos utilizando-se a ampliação média e a ampliação maior.

Tabela 4.2 – Medidas da aceleração da gravidade em função de “falsas gotas” com diâmetro nominal crescente e da ampliação da imagem

Diâmetro Nominal (mm)	Aceleração da Gravidade medida (m/s^2)					
	Ampliação média	Δ	Maior Ampliação	Δ	Valor Médio	Δ
0,7962	9,93	0,15	9,26	-0,52	9,60	-0,18
1,3535	9,99	0,21	9,85	0,07	9,92	0,14
1,9617	9,41	-0,37	9,61	-0,17	9,51	-0,27
2,3763	8,69	-1,09	10,21	0,43	9,45	-0,33
3,1723	9,41	-0,37	9,74	-0,04	9,58	-0,20
Desvio padrão:	0,52		0,34	Média Global:	9,61	-0,17

Onde Δ é a diferença entre a gravidade medida e a gravidade estimada ($9,7838163 \text{ m/s}^2$) e o valor médio representa a média entre os valores com ampliação média e maior.

A Figura 4.3 e a Figura 4.4 apresentam as curvas posição *versus* tempo para todas as “gotas falsas” nas ampliações grande e média, respectivamente. Observa-se que há uma pequena dispersão entre as curvas obtidas, mais evidenciada para as curvas levantadas com maior ampliação. Isso pode ser atribuído à característica inadequada do eletroímã construído, que possui uma grande inércia magnética, o que provocou lançamentos forçados pela reversão dos pólos do ímã, como citado anteriormente. Considera-se que o resultado apresentado, principalmente na ampliação média, satisfaz ao que se pretende no levantamento das curvas posição *versus* tempo das gotas em transferência, permitindo avaliar com certa clareza a aleatoriedade do movimento de cada uma das gotas metálicas em transferência em comparação com as demais de um mesmo experimento.

Da Figura 4.5 à Figura 4.9 têm-se uma separação das curvas levantadas para cada “falsa gota”. Para que as curvas não ficassem sobrepostas, com o intuito de avaliar a dispersão de cada uma delas, foi feito um deslocamento (“offset”) para a esquerda de cada curva obtida com a maior ampliação. Em todos os casos o coeficiente de correlação obtido foi da ordem de

0,9999 ou superior. Contudo, ainda observa-se que há, na maioria dos casos, uma pequena dispersão dos pontos em relação à sua curva de ajuste. Esta dispersão, ainda que pequena, é mais evidenciada nas curvas levantadas com ampliação média, e nas curvas das esferas maiores. Este fato pode estar relacionado com a dificuldade experimental de marcar corretamente a posição dos elementos (gotas) a cada quadro de filmagem, conforme descrito no item 3.2.2.

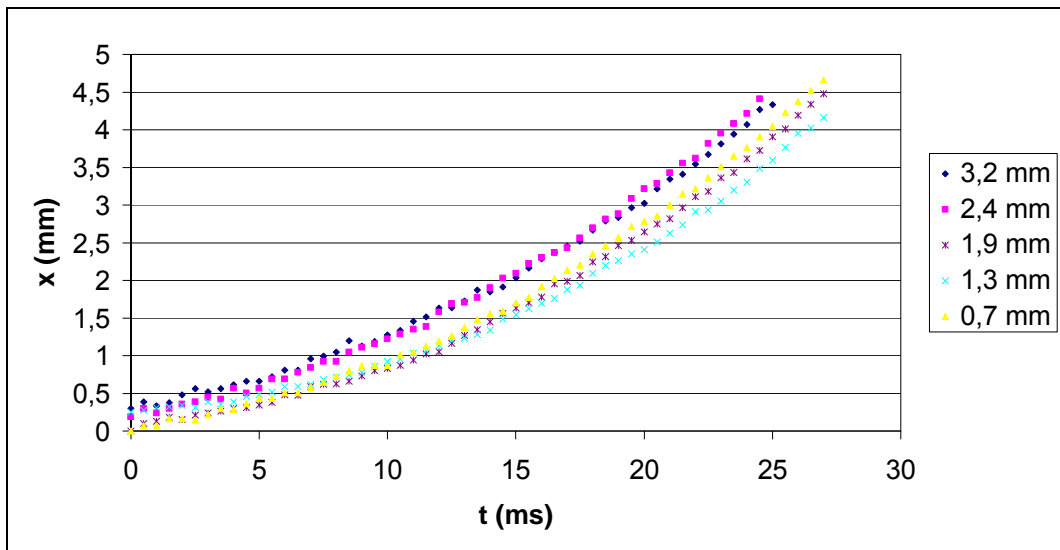


Figura 4.3 – Curvas posição x tempo obtidas com esferas de todos tamanhos em queda livre, medidas com ampliação média.

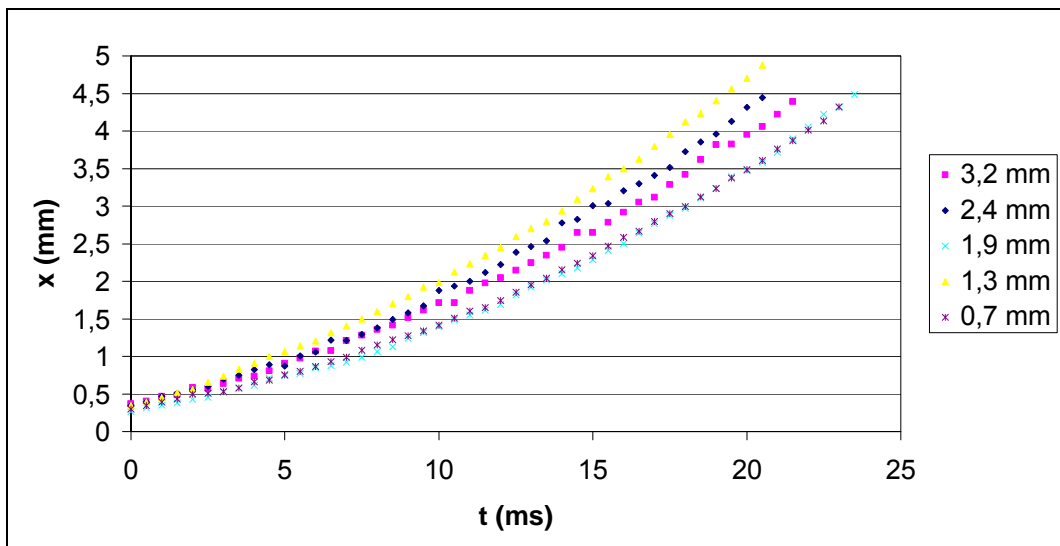


Figura 4.4 – Curvas posição x tempo obtidas com esferas de todos tamanhos em queda livre, medidas com ampliação maior.

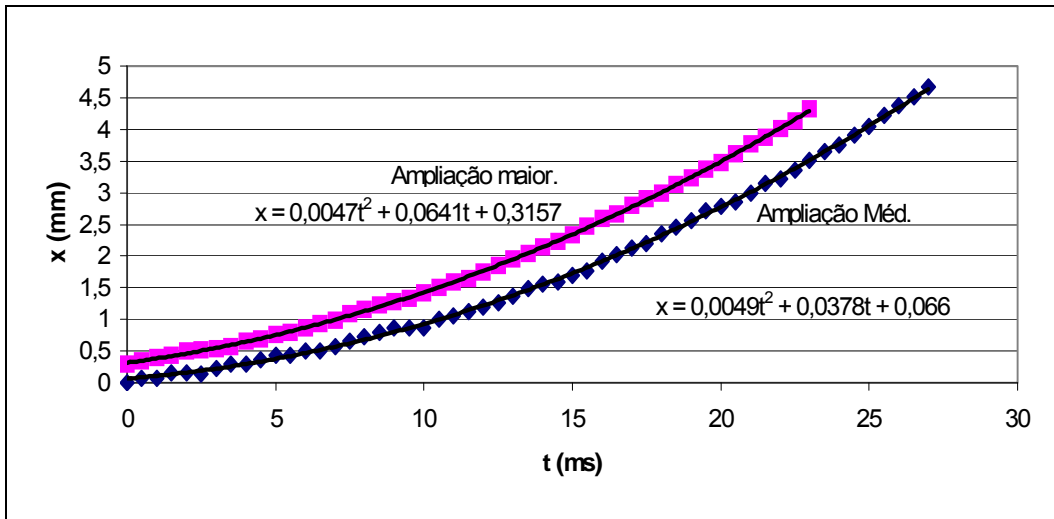


Figura 4.5 – Curvas obtidas para a “falsa gota” de 0,7 mm.

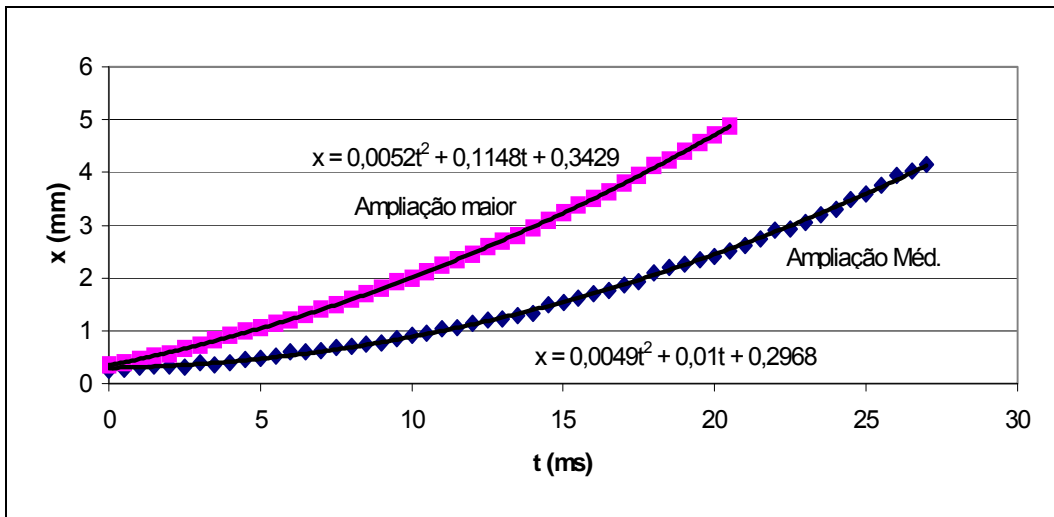


Figura 4.6 - Curvas obtidas para a “falsa gota” de 1,3 mm

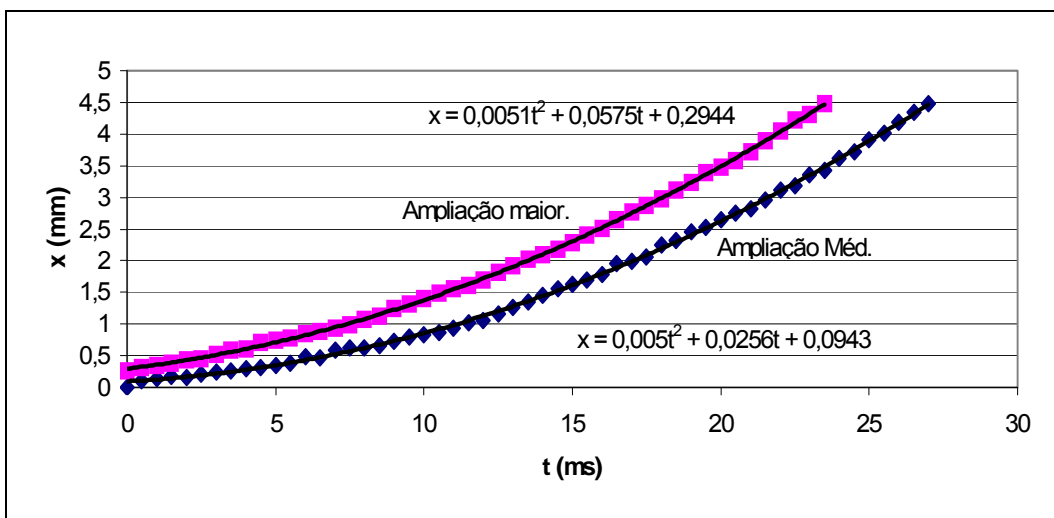


Figura 4.7 - Curvas obtidas para a “falsa gota” de 1,9 mm

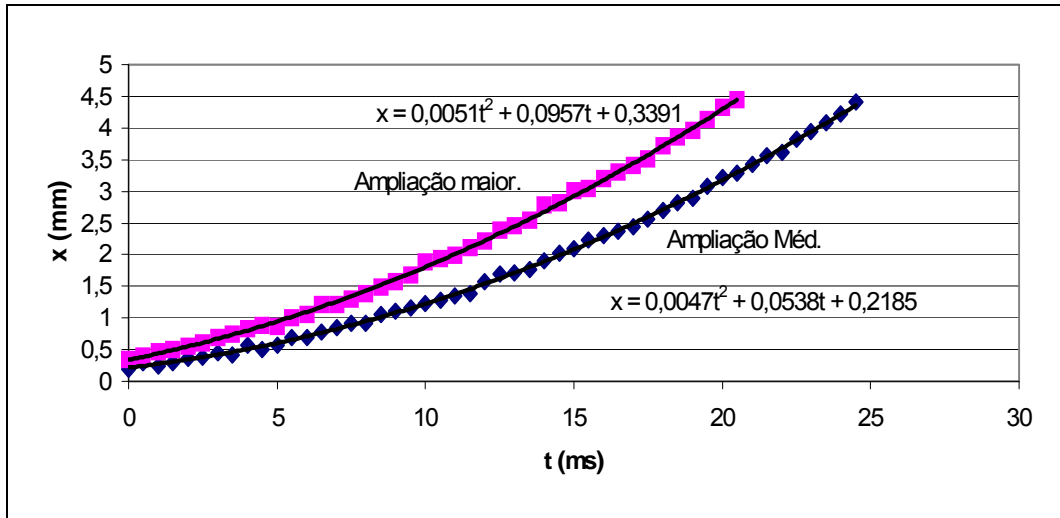


Figura 4.8 - Curvas obtidas para a “falsa gota” de 2,4 mm

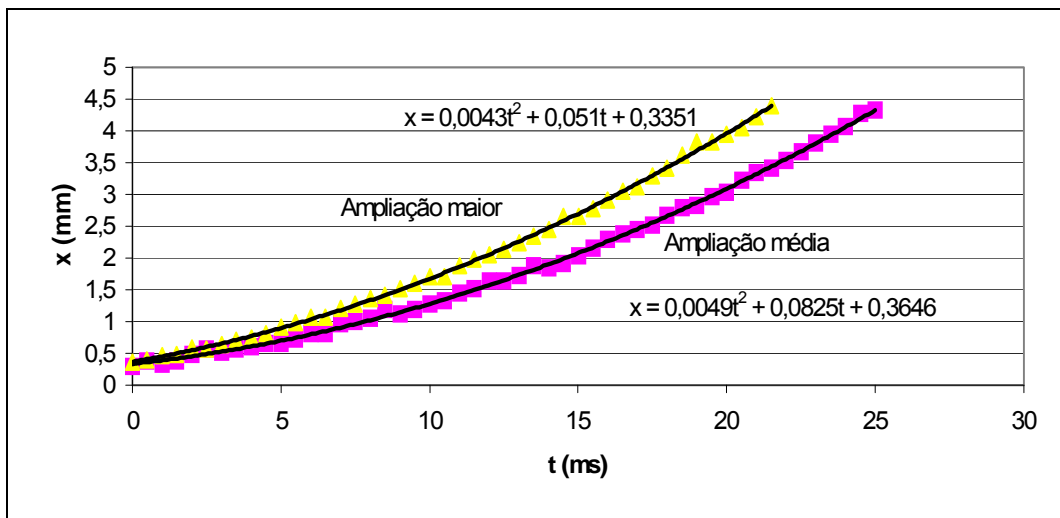


Figura 4.9 - Curvas obtidas para a “falsa gota” de 3,2 mm

4.3 Conclusão

A técnica de levantamento das curvas posição versus tempo das gotas em transferência utilizando o programa “Optimas MA®” apresentou desempenho satisfatório na avaliação, a partir da qual se pode enumerar suas principais características:

- Há dispersão dos pontos experimentais devido à dificuldade de posicionar fielmente os alvos nas imagens (tal como na Figura 3.6);
- Há dispersão no valor da aceleração determinada através das curvas, cujo erro é menor que 5%; e
- Mesmo com a dispersão apresentada, o ajuste dos pontos experimentais apresenta uma excelente correlação.

Sobre o programa "VideoAnalisador.vi", apesar de ter-se observado um erro sistemático nas medições geométricas das "falsas gotas", a ampliação empregada não influencia nas medições. Provavelmente, se por um lado tem-se mais pixels/mm, distorções provocadas pela utilização de lentes objetivas são mais críticas, e são maiores quanto maiores forem os elementos nas imagens.

Procurar-se-á utilizar sempre a maior ampliação possível em que se possa observar os elementos essenciais para a análise da transferência (eletrodo, gota e peça), dado que a maior ampliação apresentou menor dispersão nos resultados de aceleração e nas curvas de posicionamento das gotas.

Capítulo 5

5. Avaliação cinemática e dinâmica da transferência metálica em MIG/MAG com arame-eletrodo de aço carbono

5.1 Planejamento Experimental

A proposta metodológica deste capítulo é estudar as características cinemáticas e dinâmicas da transferência metálica durante o processo MIG/MAG de aço comum ao carbono, sob a influência da variação da intensidade de corrente média e do comprimento do arco. Para tanto, optou-se por usar três níveis de corrente e três níveis de Distância Bico de Contato-Peça (DBCP), estes últimos visando três comprimentos de arco distintos para cada corrente, arco curto (DBCP = 18 mm), arco médio (DBCP = 22 mm) e arco longo (DBCP = 26 mm). As soldagens foram feitas utilizando-se uma fonte de soldagem eletrônica no modo corrente constante e velocidade de alimentação constante (ver item 3.1) para cada nível de corrente, com arame de aço da classe AWS ER70S-6, $\varnothing 1,2$ mm, gás de proteção Ar + 5%O₂ e soldagens de simples deposição sobre chapas de teste de aço comum ao carbono (300 x 38 x 12,7 mm), do tipo ABNT 1020.

A Tabela 5.1 apresenta os parâmetros de regulagem (conforme o planejamento experimental 3 x 3 para I_{REG} (corrente de regulagem) e DBCP e os correspondentes valores de V_a , velocidades de alimentação de arame, e V_s , velocidade de soldagem) e monitorados durante os ensaios, ou seja, tensão média de arco (U_M) e corrente média de soldagem (I_M). Estes valores representam amostras de 5 s a uma taxa de aquisição de 10 kHz por canal e uma resolução de 12 bits. Observa-se que valores crescentes de tensão para uma mesma corrente à medida que se fez a DBCP aumentar, dando indício de que se conseguiu três valores de comprimento de arco para cada valor de corrente. Oscilogramas dos sinais de corrente e tensão referentes aos experimentos estão presentes no Anexo I.

Apesar de não estar no escopo do trabalho, achou-se interessante analisar o comportamento da relação $I_M \times U_M$ para os três níveis de comprimento de arco (análogo à DBCP), como ilustra a Figura 5.1. Como se vê, U_M , para uma dada corrente, aumenta com o crescimento do arco, mas observa-se uma variação muito maior da tensão na mudança de arco curto (DBCP 18 mm) para arco médio (DBCP = 22 mm) do que de arco médio (DBCP = 22 mm) para arco longo (DBCP = 26 mm). Este fato se justifica pela impossibilidade do volume do arco, e conseqüentemente a área de troca de calor, e/ou a área da região catódica (que são parcelas significativas na composição da tensão total do arco) crescer proporcionalmente em

relação à DBCP (o que vai mais à frente justificar o porquê de não haver uma relação exata entre o aumento da DBCP e do comprimento de arco, como esperado pela demonstração do item 3.1). Também se observa um comportamento genericamente atípico para as curvas da relação $I_M \times U_M$ a uma mesma DBCP; ao se aumentar a corrente de soldagem de 200 para 250 A, há uma tênue queda de tensão ao invés de um constante crescimento da mesma. Resultado similar foi observado por Costa (2003) e Bingul (1996) e atribuído, dentre outras hipóteses, à diferença no tamanho das gotas na transição globular-goticular e sua provável contribuição, enquanto componente da resistência no circuito bico de contato-eletrodo-gota-arco-poça (Ponomarev et al, 2002), no maior valor de tensão anterior à transição, em comparação às tensões obtidas depois da mesma. Essa situação é similar à experimentada com os parâmetros da Tabela 5.1 e é bem evidenciada em soldagens com fontes tipo corrente constante (Modenesi & Reis, 2005).

Tabela 5.1 – Parâmetros de soldagem monitorados em função dos valores de regulagem (AWS ER70S-6, $\varnothing 1,2$ mm, gás de proteção Ar + 5%O₂).

Teste	Valores de Regulagem				Valores Monitorados	
	I_{REG} (A)	DBCP (mm)	V_a (m/min)	V_s (cm/min)	I_M (A)	U_M (V)
A	200	18 (arco curto)	4,8	28,8	201	29,8
B		22 (arco médio)	4,8	28,8	200	34,9
C		26 (arco longo)	4,8	28,8	201	36,6
D	250	18 (arco curto)	6,9	40,8	250	29,4
E		22 (arco médio)	6,9	40,8	248	34,1
F		26 (arco longo)	6,9	40,8	248	36,3
G	300	18 (arco curto)	8,3	50,0	299	33,2
H		22 (arco médio)	8,3	50,0	297	37,4
I		26 (arco longo)	8,3	50,0	297	39,6

Ainda tentando confirmar os resultados apresentados na Figura 5.1, apresenta-se na Figura 5.2 curvas da velocidade de fusão para arames AWS ER 70S-6 com diâmetro de 1,0 e 1,2 mm, obtidas por Modenesi & Reis (2005), utilizando Ar + 2%O₂ como gás de proteção, e também em corrente constante. Sobre estas curvas foram sobrepostos pontos representativos da relação $I_M \times V_a$, retirados da Tabela 5.1, obtidos em condição experimental semelhante, mas um pouco diferente (lembrar que a velocidade de alimentação corresponde à taxa de fusão). As principais diferenças experimentais entre os dois levantamentos é que Modenesi & Reis (2005) utilizaram como gás de proteção Ar + 2%O₂ e comprimento energizado de eletrodo de 13 mm, enquanto aqui se usou Ar + 5% O₂ e aproximadamente 14 mm respectivamente.

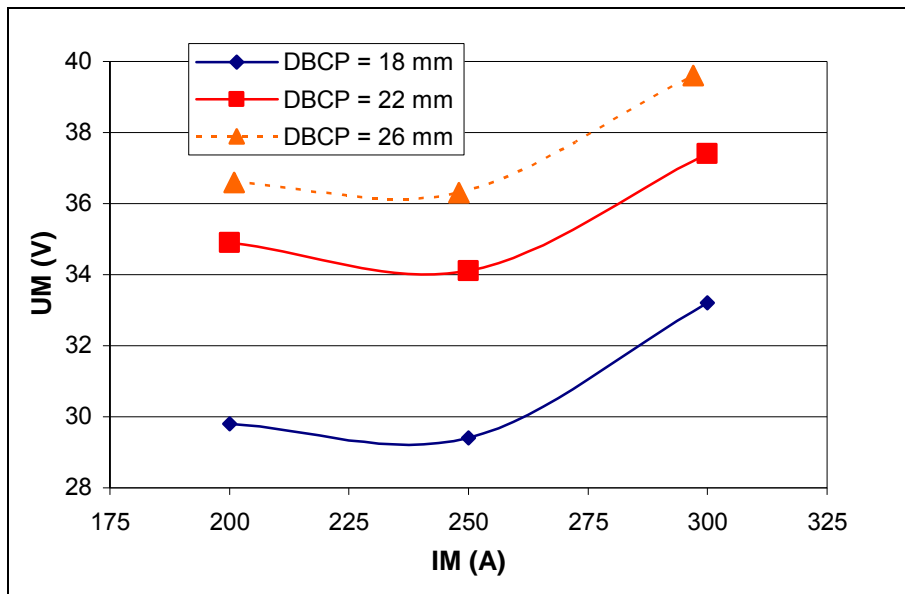


Figura 5.1 – Características estáticas dos arcos obtidos.

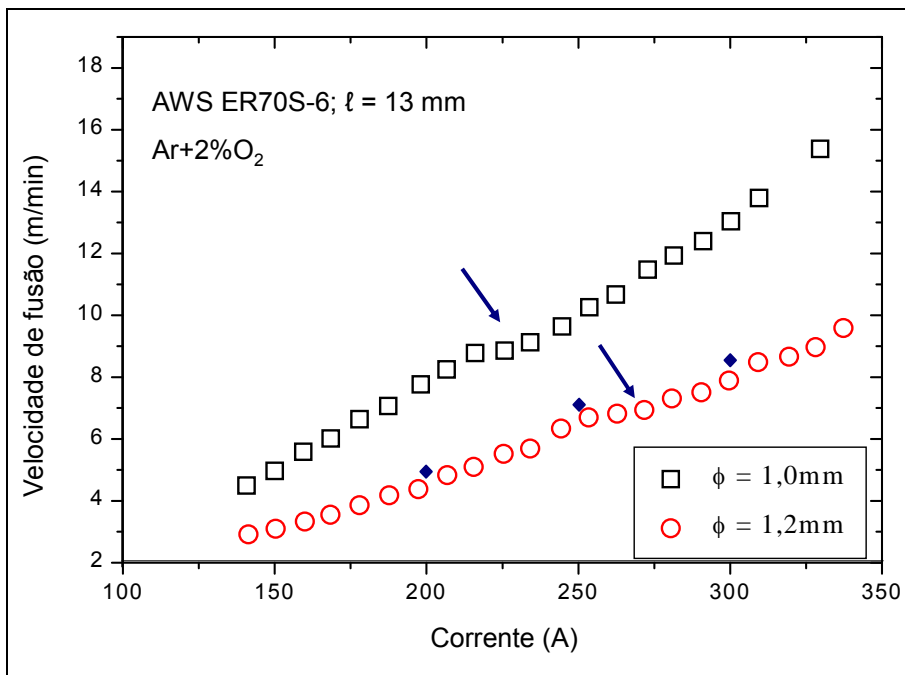


Figura 5.2 – Comparação das relações entre corrente e taxa de fusão obtidos (pontos cheios) e os dados de Modenesi & Reis (2005)

Pode-se observar uma anomalia nas curvas (indicadas por setas) de Modenesi & Reis (2005), caracterizada pela redução de sua primeira derivada. A anomalia começa ao redor de 200 A para arame de 1,0 mm e de 250 A para arame de 1,2 mm, e foi atribuída pelos autores à transição de goticular para goticular com alongamento. Observa-se uma grande semelhança dos pontos experimentais deste trabalho com os pontos da curva dos autores acima mencionados.

5.2 Caracterização geométrica da transferência metálica

A Figura 5.3 mostra quadros representativos das soldagens realizadas, permitindo uma visualização dos tipos de transferências e comprimentos de arco alcançados com as combinações de parâmetros, enquanto a Tabela 5.2 apresenta os resultados das quantificações geométricas e as frequências das gotas em transferência. Observa-se, por estas figura e tabela, que o comprimento do arco (a) aumentou aproximadamente na mesma razão em que se aumentou a DBCP. Pequenas variações (Δa) entre valores do comprimento de arco (medido com o "Vídeo Analisador") em relação ao esperado pela variação da DBCP podem ser devidas ao fato de que, ao se alterar a corrente e/ou o comprimento do arco, também se promovam alterações nas composições químicas do plasma, conseqüentemente nas suas propriedades térmicas (podendo modificar as constantes α e β da equação geral de consumo – Equação 3.1) e nas formas de escoamento do mesmo (afetam a velocidade do plasma, conseqüentemente agindo de forma diferenciada sobre o arraste da gota e atrito com o meio), além das razões das alterações intrínsecas da geometria do arco já citadas para explicar a variação da tensão no item anterior. O desvio padrão do comprimento do arco medido (σa) apresentou-se maior para transferência globular, fato atribuído à própria natureza desse modo de transferência, onde a conexão do arco com o eletrodo tende a se manter abaixo das gotas (Ponomarev et al., 2002), expressivamente maiores que no modo goticular.

A Tabela 5.2 ainda apresenta os valores médios do diâmetro das gotas (d), seus desvios padrão (σd), bem como de sua frequência de destacamento (f). Para se verificar a coerência dos valores obtidos dos diâmetros das gotas, procede-se a análise a seguir. A Tabela 5.3 apresenta uma estimativa da frequência real de destacamento baseada nas medições do diâmetro das gotas e seu desvio padrão, apresentados na tabela anterior. Para a estimativa da massa das gotas (M_g), adotou-se, para a densidade das gotas, o valor de 7500 kg/m^3 (Kin & Na, 2001). A frequência esperada (f_{ESP}) foi calculada utilizando-se o diâmetro médio das gotas; a máxima frequência foi calculada utilizando-se o diâmetro mínimo das gotas, ou seja, o diâmetro médio subtraído do desvio padrão; e a frequência mínima foi calculada de forma análoga, mas com o máximo diâmetro das gotas. Observa-se que em todos os casos as frequências medidas estão entre a máxima e a mínima frequência esperadas, e são menores que a frequência esperada calculada. Este comportamento dá a entender que a maioria das gotas tende a ser um pouco maior que a média, o que faz com que a frequência medida seja um pouco menor que a esperada. Lembrando que nestes cálculos não se levou em consideração a evaporação do material da gota, considera-se coerente o comportamento observado para as frequências obtidas em relação ao intervalo de frequência esperada obtido.

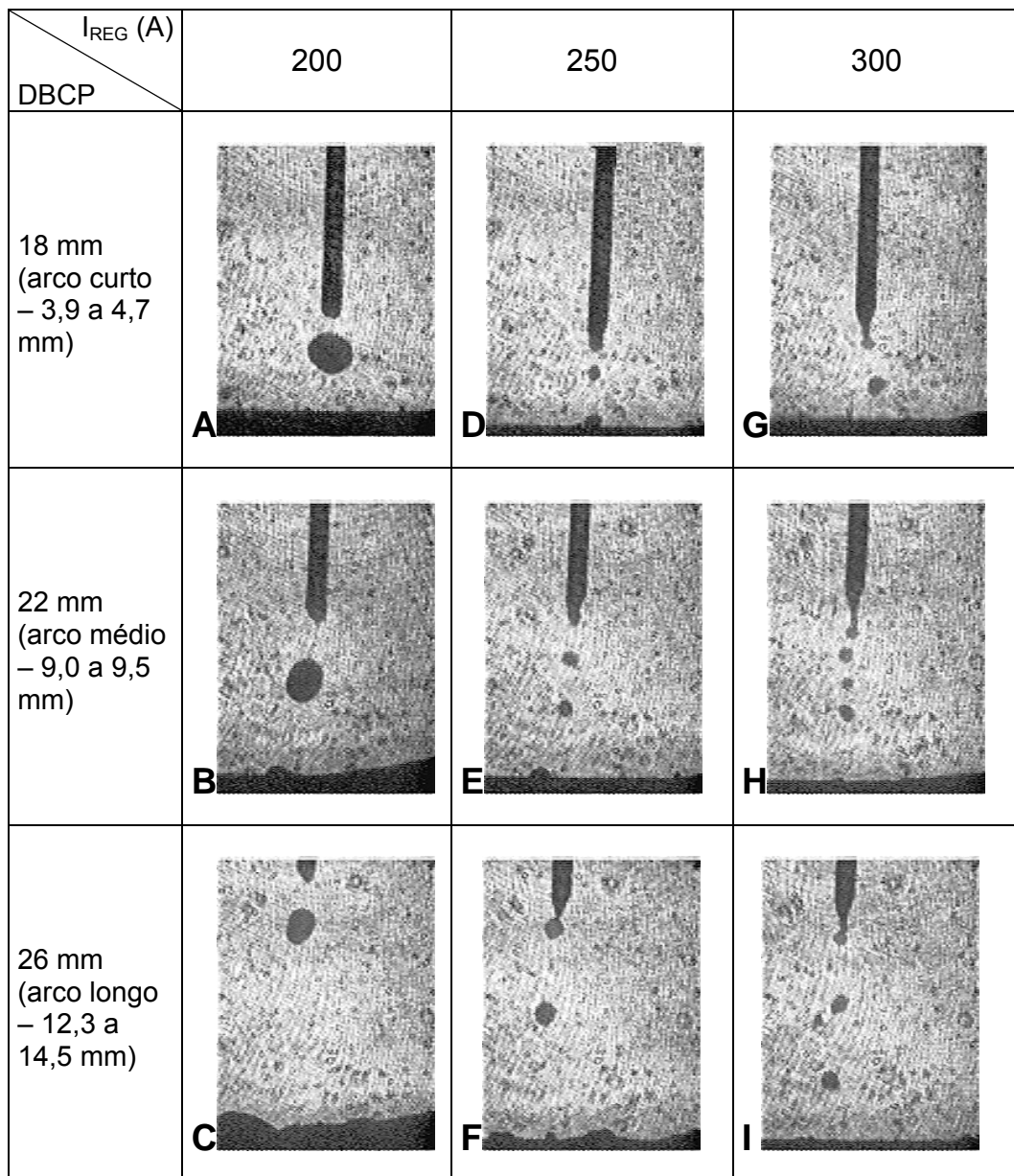


Figura 5.3 – Filmagens realizadas dispostas em função da DBCP e da corrente de soldagem.

Tabela 5.2 – Características geométricas das transferências metálicas.

Teste	I_{REG} (A)	DBCP (mm)	a (mm)	Δa (mm)	σa (mm)	d (mm)	Δd (mm)	σd (mm)	f (Hz)
A	200	18	3,9	-	2,4	2,2	-	0,4	14
B		22	9,0	5,1	2,9	1,8	-0,4	0,4	16
C		26	14,5	5,5	2,1	1,5	-0,3	0,3	32
D	250	18	3,7	-	1,1	1,1	-	0,2	211
E		22	9,3	5,6	1,3	1,1	-	0,1	172
F		26	13,2	3,9	1,4	1,0	-0,1	0,2	210
G	300	18	4,7	-	1,2	0,8	-	0,1	548
H		22	9,5	4,8	1,4	0,8	-	0,1	520
I		26	12,3	2,8	1,4	0,7	-0,1	0,2	525

Tabela 5.3 – Relação entre a frequência esperada de destacamento e a frequência real.

Teste	I_{REG} (A)	a (mm)	V_a (kg/s)	d (mm)	Mg (kg)	f_{ESP} (Hz)	Max (Hz)	Min (Hz)	f (Hz)
A	200	3,9	7,05E-04	2,2	4,2E-05	17	31	10	14
B		9,0	7,05E-04	1,8	2,3E-05	31	65	17	16
C		14,5	7,05E-04	1,5	1,3E-05	53	104	31	32
D	250	3,7	1,01E-03	1,1	5,2E-06	194	354	118	211
E		9,3	1,01E-03	1,1	5,2E-06	194	258	150	172
F		13,2	1,01E-03	1,0	3,9E-06	258	505	150	210
G	300	4,7	1,22E-03	0,8	2,0E-06	607	906	426	548
H		9,5	1,22E-03	0,8	2,0E-06	607	906	426	520
I		12,3	1,22E-03	0,7	1,3E-06	906	2486	426	525

Voltando a análise da Tabela 5.2, observa-se que ao se aumentar a corrente, para um dado nível de comprimento de arco (valor de DBCP), há uma tendência clara de redução dos diâmetros médios, bem como um aumento nas frequências de destacamento das gotas, como esperado, consequência da ação de um maior efeito “pinch”. Observa-se também que há uma tendência de redução dos diâmetros médios das gotas, bem como um aumento nas suas frequências de destacamento, com o aumento do comprimento do arco (aumento da DBCP) para o menor valor de corrente (200 A, com transferência globular). Este fato, ao contrário do apontado acima, não seria o esperado, já que a taxa de fusão (imposta pela V_a) e corrente mantiveram-se constantes para cada caso (a transferência deveria ficar igual). Mesmo que esta característica (redução dos diâmetros e aumento da frequência de destacamento das gotas com o aumento do comprimento do arco na menor corrente) não tenha ficado clara para as correntes maiores, acredita-se que o fenômeno pode estar relacionado com o efeito de arraste dos gases, que só se pronunciaria significativamente em gotas grandes. Em outras palavras, o aumento do comprimento de arco (apenas em $I_{REG} = 200$ A, ou seja, com o mesmo efeito “pinch”) afetaria os componentes considerados pela teoria do balanço estático das forças, a qual governa bem o modo globular, muito embora não se aplique fielmente ao modo goticular de transferência metálica (Scotti, 1998).

5.3 Medição das características cinemáticas das gotas

Para a caracterização cinemática das gotas, foi determinado o número mínimo para amostragem utilizou-se o critério de determinação do número mínimo de amostras para pequenas populações, com um nível de confiança de 95%, segundo a distribuição *t*-Student. Assim, foram realizadas medidas em 9 gotas de cada experimento, escolhidas aleatoriamente 3 no começo do filme, 3 no meio e 3 no final, diferentemente de Jones et al (1998c), que optou

por levantar trajetórias apenas de 2 gotas consecutivas em cada um de seus experimentos, sem ter avaliado a representatividade dessa amostra, como mostrado no Capítulo 2.

As Figuras 5.4 a 5.12 apresentam as curvas de posição *versus* tempo das 9 gotas para cada condição estudada neste capítulo. O fato das curvas em cada experimento serem diferentes entre si leva a crer que cada gota é criada e viaja no plasma de maneira particular, mesmo sob, em média, a mesma condição. Este fenômeno pode ser causado por várias razões aleatórias, dentre as quais as variações no fluxo de plasma, como turbulências e variações na densidade, forças de reação advindas da própria gota, tais como reações químicas com perda ou ganho de massa, mudanças de forma e dimensão ou variações na densidade da gota. Mas, de uma forma geral, os experimentos com maior corrente e menor comprimento de arco apresentaram um comportamento mais homogêneo com relação à dispersão. Acredita-se que isso pode ser devido a diferenças de massa entre as gotas de experimentos com correntes diferentes (pode-se esperar que gotas maiores sejam mais sensíveis a perturbações de fluxo) ou diferenças de massa entre as gotas num mesmo experimento (σ_d na ordem do tamanho das gotas). Ainda observando as Figuras 5.4 a 5.12, um aumento no comprimento do arco, bem como uma redução de corrente tornam as curvas mais “parabólicas”, evidenciando a existência de uma aceleração média (positiva) sobre as gotas nestas condições (como demonstrado pela tendência crescente da velocidade mostrada na Figura 5.13).

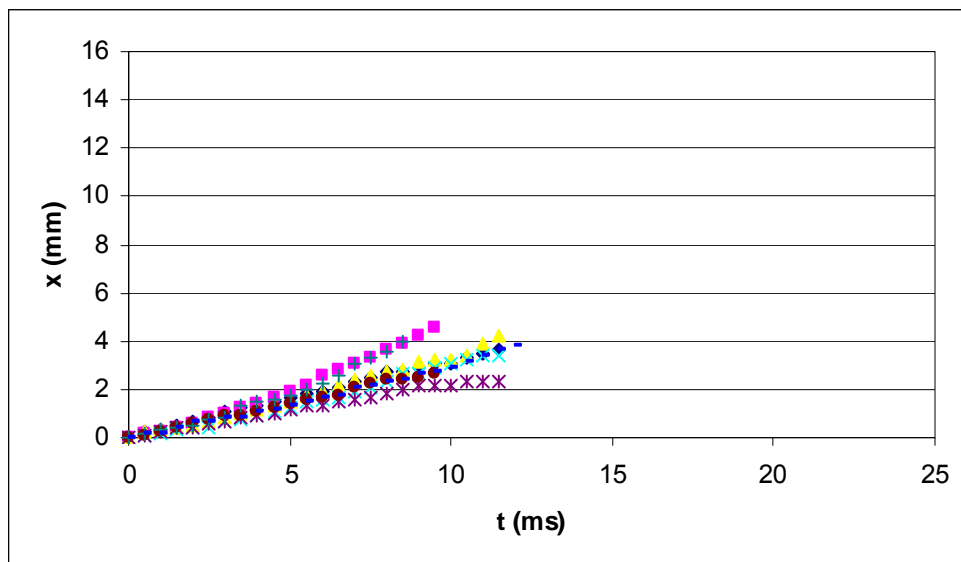


Figura 5.4 – Curvas posição x tempo, teste A. $I = 200$ A; DBCP = 18 mm ($a = 3,9$ mm)

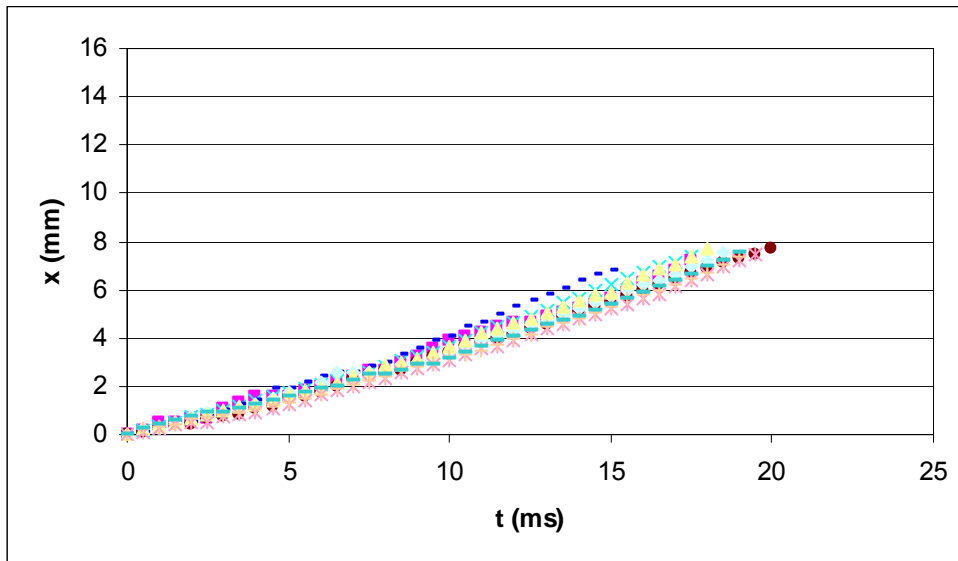


Figura 5.5 – Curvas posição x tempo, teste B. $I = 200$ A; DBCP = 22 mm. ($a = 9$ mm)

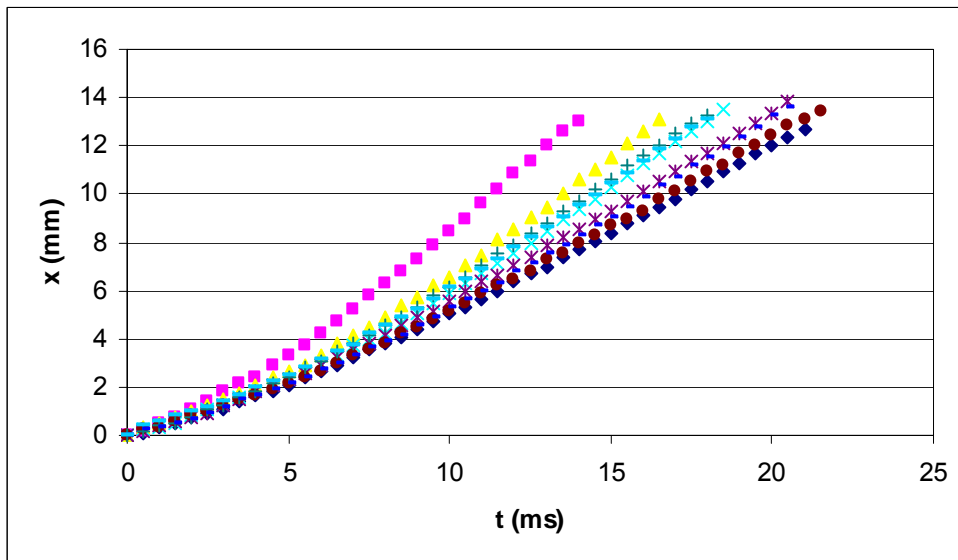


Figura 5.6 – Curvas posição x tempo, teste C. $I = 200$ A; DBCP = 26 mm. ($a = 14,5$ mm)

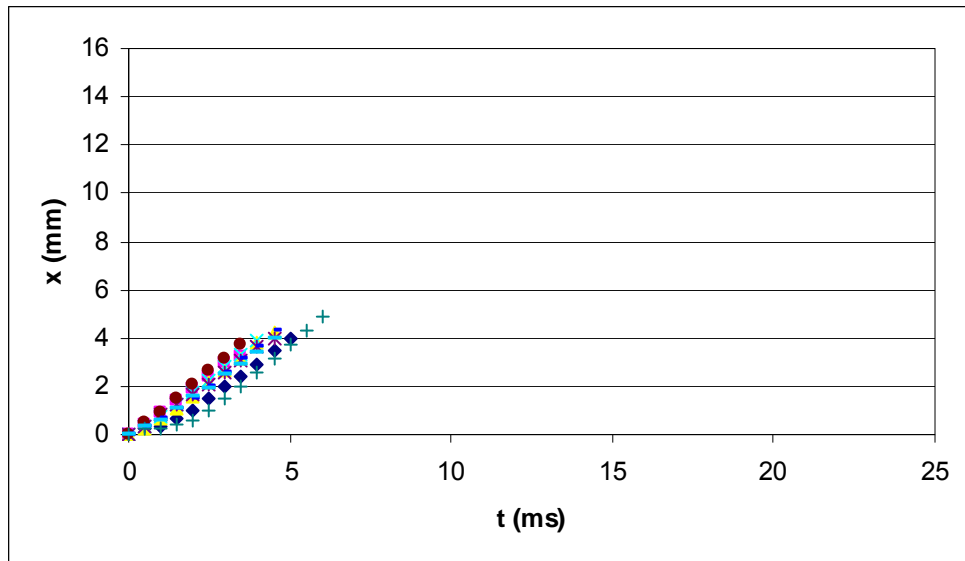


Figura 5.7 – Curvas posição x tempo, teste D. $I = 250$ A; DBCP = 18 mm. ($a = 3,7$ mm)

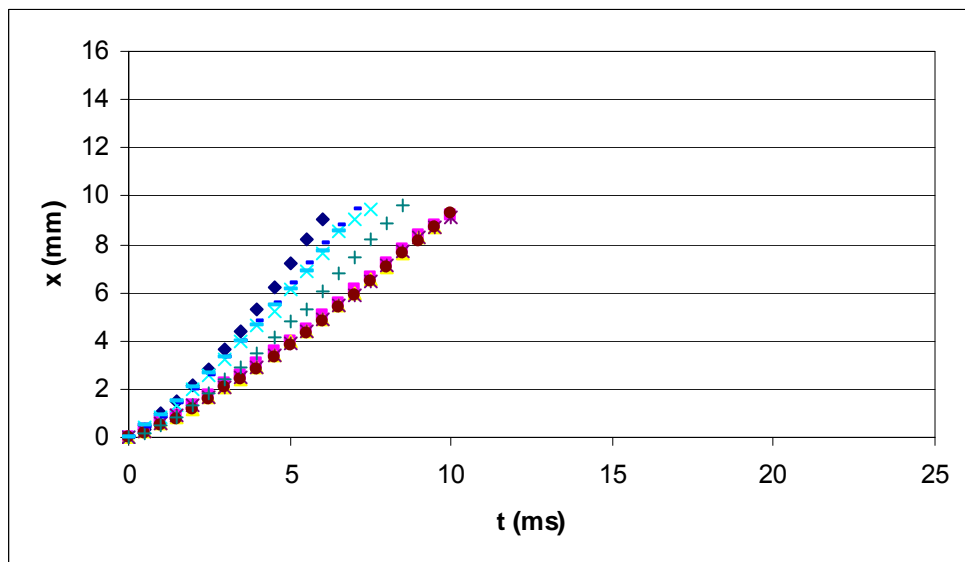


Figura 5.8 – Curvas posição x tempo, teste E. $I = 250$ A; DBCP = 22 mm. ($a = 9,3$ mm)

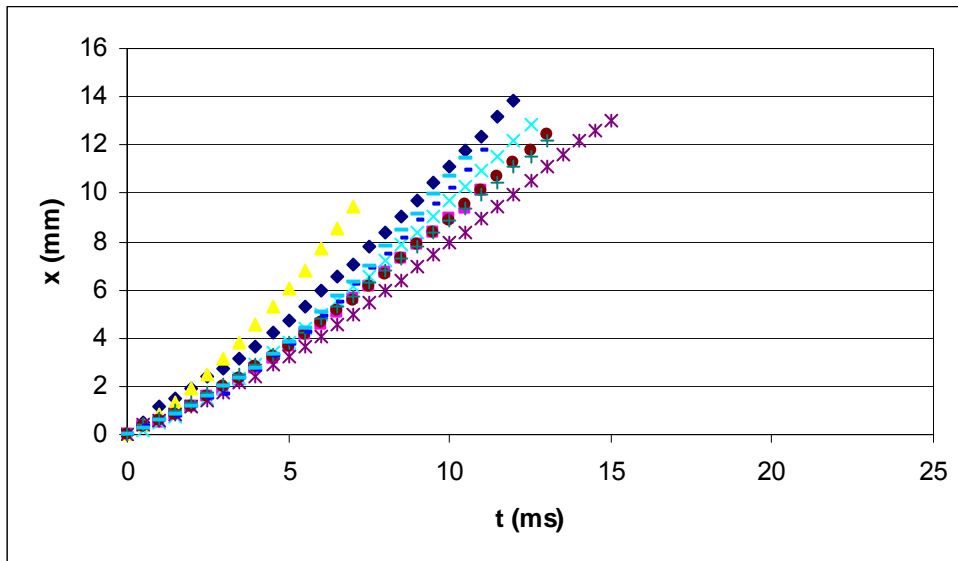


Figura 5.9 – Curvas posição x tempo, teste F. $I = 250$ A; DBCP = 26 mm. ($a = 13,2$ mm)

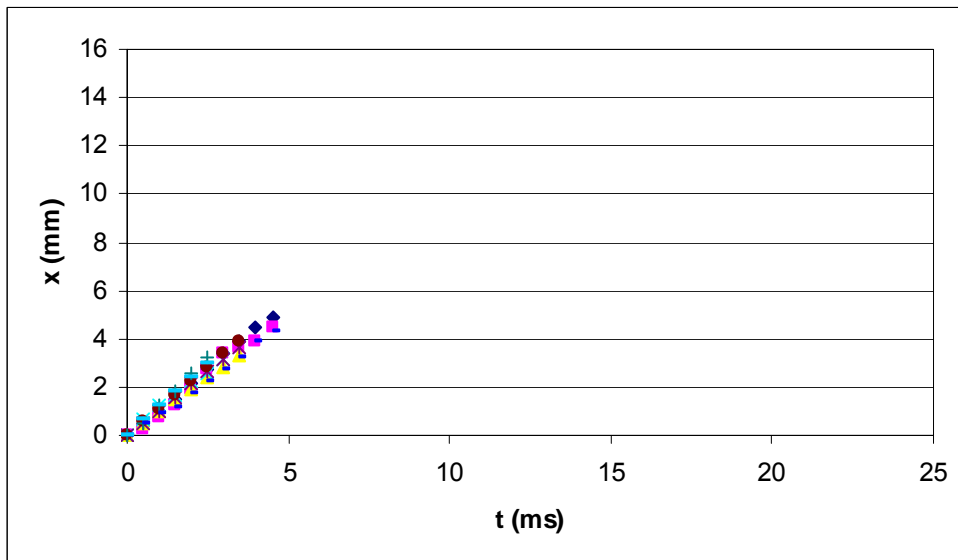


Figura 5.10 – Curvas posição x tempo, teste G. $I = 300$ A; DBCP = 18 mm. ($a = 4,7$ mm)

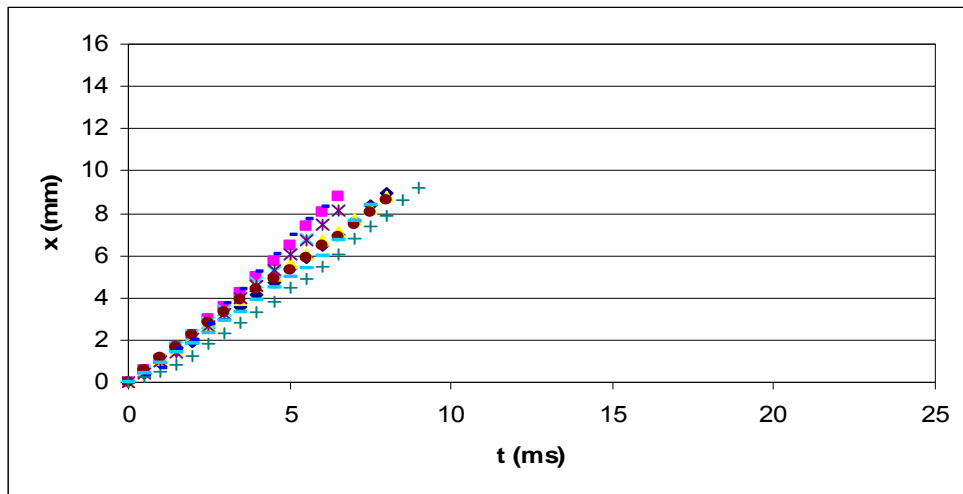


Figura 5.11 – Curvas posição x tempo, teste H. I = 300 A; DBCP = 22 mm. (a = 9,5 mm)

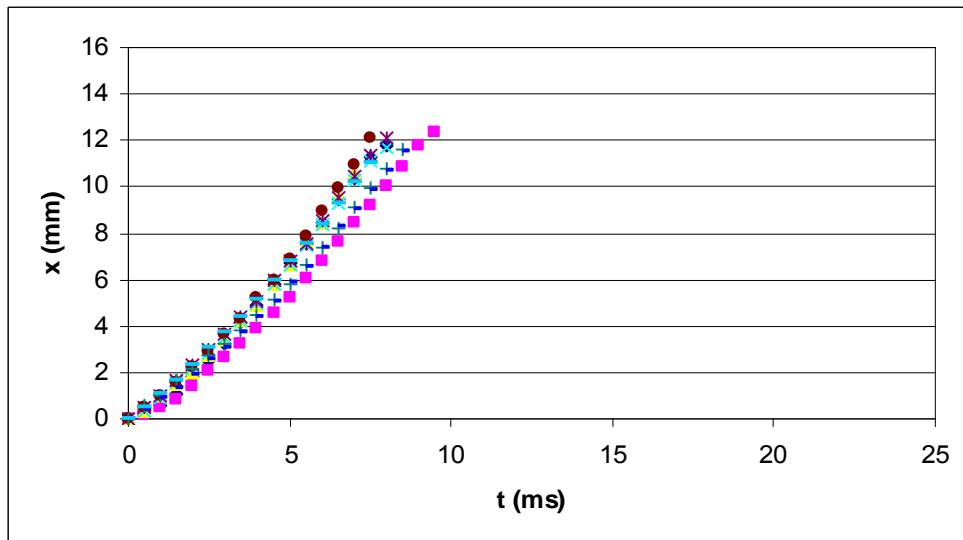


Figura 5.12 – Curvas posição x tempo, teste I. I = 300 A; DBCP = 26 mm. (a = 12,3 mm)

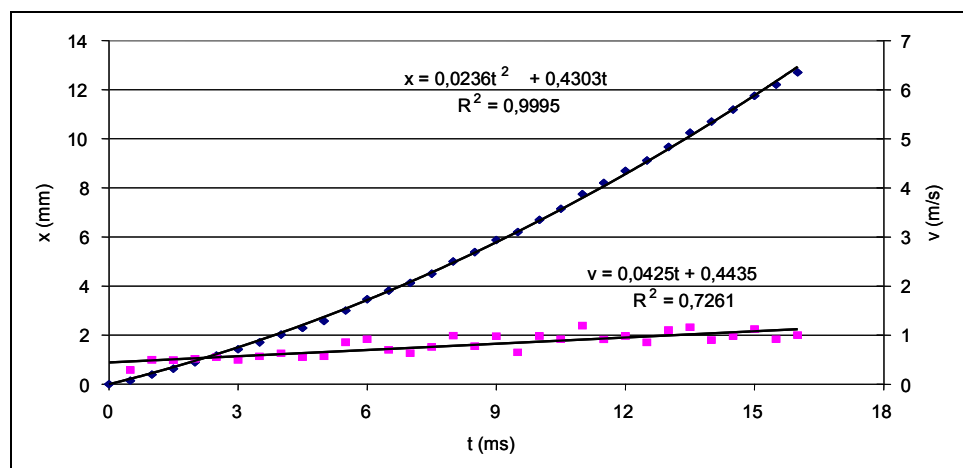


Figura 5.13 – Ilustração do efeito do parabolismo das curvas posição x tempo sobre a velocidade das gotas em transferência. (I = 250 A; a = 13,2 mm).

5.3.1. Avaliação da velocidade de chegada da gota à poça de fusão

Para a medição das velocidades de chegada das gotas à poça de fusão (V_{CHE}) utilizou-se os dois últimos pontos das curvas posição *versus* tempo de cada gota, conforme descrito no Capítulo 3. As Tabela 5.4 e Tabela 5.5 mostram as medidas realizadas para cada gota amostrada, bem como suas médias e o resultado da análise de variância (ANOVA). Percebe-se que o comprimento do arco afeta significativamente V_{CHE} , com 99% de certeza nos níveis de corrente de 200 e 300 A, e com 93% de certeza à corrente de 250 A. Já a corrente de soldagem afeta significativamente a V_{CHE} nos três níveis de comprimento do arco. Lin et al (2001) mostraram o efeito da corrente de soldagem e do diâmetro do eletrodo na velocidade das gotas logo após o destacamento, obtiveram valores da ordem de 0,5 m/s para a corrente de 200 A, e de 1,3 m/s para 250 A, como pode ser visto na Figura 2.21, da mesma ordem das velocidades aqui observadas.

Tabela 5.4 – Velocidade de chegada: medidas, médias e resultado da ANOVA (V_{CHE} – I x comprimento do arco (análogo à DBCP)).

Corrente arco	200			250			300		
	Curto	Médio	Longo	Curto	Médio	Longo	Curto	Médio	Longo
Medidas (m/s)	0,59	0,84	0,56	0,49	1,40	1,28	0,93	1,13	1,82
	0,66	0,80	0,92	0,83	1,40	1,40	1,36	1,52	1,84
	0,34	0,49	1,00	1,05	1,62	1,75	1,31	1,13	2,00
	0,27	0,28	0,98	1,12	1,17	1,28	1,17	1,33	1,68
	0,20	0,77	1,06	1,12	0,88	0,76	1,12	1,35	1,84
	0,40	0,64	0,58	1,12	0,95	1,26	0,98	1,14	1,96
	0,80	0,65	0,70	1,12	1,39	1,24	1,05	1,18	1,70
	0,59	0,77	0,78	1,33	0,80	1,56	1,21	1,27	1,60
	0,59	0,67	0,80	1,12	1,70	1,56	1,01	1,55	1,68
Média (m/s)	0,48	0,66	0,82	1,03	1,26	1,34	1,13	1,29	1,79
Nível de significância	p < 0,01			p = 0,07			p < 0,01		

A visualização do efeito de I e do comprimento do arco sobre V_{CHE} (Figura 5.14) mostra que V_{CHE} cresce para arcos maiores independentemente da corrente. Este fato é justificável pela cinemática, em que corpos acelerados adquirem maior velocidade se viajarem por uma maior distância. Além disso, as gotas em arcos longos demoram mais tempo até sofrerem uma eventual ação de frenagem pelos vapores metálicos gerados na poça de fusão (ver um efeito claro de frenagem na Figura 5.4, com 200 A e arco curto, ou seja, DBCP de 18 mm). A Figura 5.14 mostra também que o efeito da corrente é dependente de seu valor; V_{CHE} é menor para baixa corrente, onde as gotas são maiores das que as das correntes de 250 e 300 A, para as quais as gotas têm tamanhos mais próximos. Este fato caracteriza a importância do

tamanho da gota, como pode ser visualizado na Figura 5.15, onde se pode perceber de forma mais clara a tendência de queda de V_{CHE} com o aumento do diâmetro das gotas. Considerando que as velocidades iniciais das gotas, ainda em formação e junto ao arame, são as mesmas em cada corrente (ou seja, cada corrente tem apenas uma velocidade de alimentação do eletrodo), a razão para tal tendência é provavelmente aerodinâmica. Considerando que o jato de plasma deva ter velocidade maior do que das gotas, da ordem de 100 m/s (Jones et al, 1998c; Hu & Tsai, 2007a), a ação do atrito do plasma com as gotas (ver Figura 2.10) deveria ser a de aumentar a velocidade de gotas maiores (maior arraste), o que não aconteceu provavelmente devido à sua maior massa, maior inércia.

Tabela 5.5 – Velocidade de chegada: medidas, médias e resultado da ANOVA (V_{CHE} – comprimento do arco (análogo à DBCP) x I).

Arco	Curto			Médio			Longo		
	200	250	300	200	250	300	200	250	300
Medidas (m/s)	0,59	0,49	0,93	0,84	1,40	1,13	0,56	1,28	1,82
	0,66	0,83	1,36	0,80	1,40	1,52	0,92	1,40	1,84
	0,34	1,05	1,31	0,49	1,62	1,13	1,00	1,75	2,00
	0,27	1,12	1,17	0,28	1,17	1,33	0,98	1,28	1,68
	0,20	1,12	1,12	0,77	0,88	1,35	1,06	0,76	1,84
	0,40	1,12	0,98	0,64	0,95	1,14	0,58	1,26	1,96
	0,80	1,12	1,05	0,65	1,38	1,18	0,70	1,24	1,70
	0,59	1,33	1,21	0,77	0,80	1,27	0,78	1,56	1,60
	0,59	1,12	1,01	0,67	1,70	1,55	0,80	1,56	1,68
Média (m/s)	0,48	1,03	1,13	0,66	1,26	1,29	0,82	1,34	1,79
Nível de significância	p < 0,01			p < 0,01			p < 0,01		

Percebe-se, consoantemente com os resultados de Rhee & Kannatey-Asibu (1992) e Lin et al (2001) para a velocidade após o destacamento, um crescimento de V_{CHE} com a corrente. Este resultado pode ser associado a uma maior velocidade inicial, devido a maior velocidade de alimentação, e uma maior força de arraste, devido à maior velocidade do jato de plasma. Também se observa que a influência da corrente é dependente de seu valor (houve pouca variação entre os valores de 250 e 300 A). Isto é justificável pelo tipo de transferência metálica, que para a corrente menor é globular, passando a goticular nas correntes maiores, mesmo que com gotas menores para maiores valores de corrente. Deve-se chamar atenção para o fato de que a velocidade inicial (aproximadamente igual à velocidade de alimentação) é sensivelmente menor do que a V_{CHE} (comparar V_a na Tabela 5.1 com V_{CHE} na Tabela 5.4). Porém, com o arco mais longo (DBCP = 26 mm) percebe-se variação da V_{CHE} para maiores níveis de corrente. Acredita-se que em arcos mais longos a força de arraste seja maior, de tal forma a afetar a velocidade com que chegam mesmo gotas pequenas, aerodinamicamente

menos sensíveis a esta componente. Algumas das hipóteses levantadas aqui deverão se repetir nas análises de experimentos com outros gases de proteção e outros materiais, tal como na soldagem com alumínio.

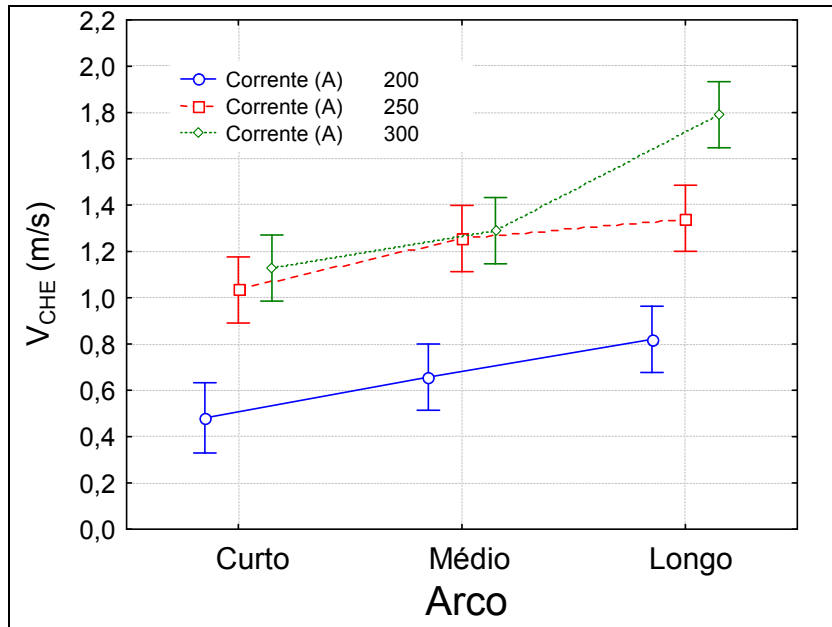


Figura 5.14 – Efeito de “I” e do comprimento do arco sobre “ V_{CHE} ”.

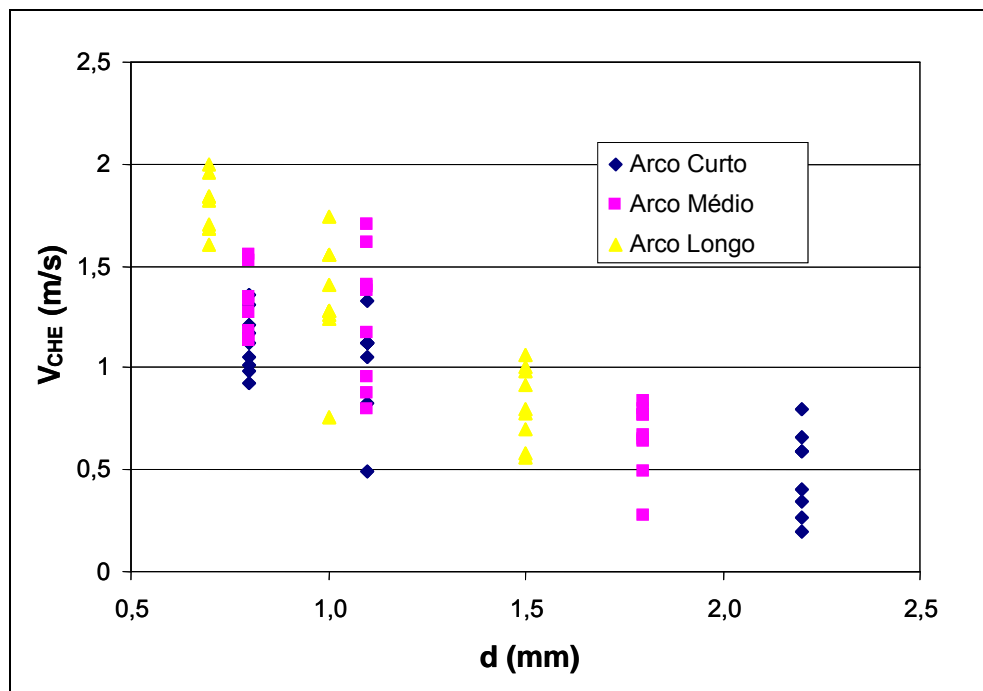


Figura 5.15 – Efeito do diâmetro das gotas sobre V_{CHE} .

5.3.2. Avaliação da aceleração média da gota durante a trajetória

Para a determinação da aceleração média das gotas durante a trajetória (A_{MED}), utilizou-se as equações de ajuste dos pontos das trajetórias levantadas, tal como procederam Jones et al (1998c). Obtém-se A_{MED} através do dobro do coeficiente do termo quadrático das equações dessas curvas.

A Tabela 5.6 e a Tabela 5.7 apresentam as medidas e o resultado da ANOVA em cada corrente e em cada comprimento de arco utilizados, respectivamente. Jones et al (1998c) obtiveram, soldando com eletrodos de diâmetro 1.6 mm, por conseguinte com gotas de maiores dimensões, valores de aceleração média das gotas durante a transferência da ordem de 20 m/s² para a corrente de 200 A, 35 m/s² para correntes de 250 A e 58 m/s² para correntes de 280 A, como pode ser observado na Figura 2.25. Na Tabela 5.6, observa-se que o comprimento do arco afetou a aceleração média das gotas principalmente nas soldagens com 200 A de corrente. Aos 300 A de corrente, observa-se que o comprimento do arco (análogo a DBCP) afeta com 94% de certeza a aceleração média durante a trajetória. Na Tabela 5.7 observa-se que a corrente exerce influência sobre a aceleração média durante a trajetória para níveis de DBCP 18 e 22 mm, ou seja, para arcos curtos e médios respectivamente. Essa influência ocorre de maneira similar nos dois comprimentos de arco citados, onde a aceleração média das gotas durante a trajetória apresenta maiores valores quando a corrente é de 250 A. O experimento apresentado no Capítulo 4 permite salientar o comportamento errático de A_{MED} em cada experimento. Isto enfatiza também a particularidade da viagem de cada uma das gotas através do plasma, o que não foi salientado no estudo de Jones et al (1998c). Devido a isto é que não foi determinado o número mínimo de experimentos necessários à satisfação do critério estatístico.

A Figura 5.16 apresenta o efeito de I e do comprimento do arco sobre A_{MED} . Observando as curvas da Figura 5.16, vê-se que à corrente de 300 A, o efeito do comprimento do arco sobre A_{MED} é diferente do apresentado para as correntes de 200 e 250 A. A maior A_{MED} das gotas nos arcos mais longos demonstra ser prioritariamente devido ao efeito da cinemática, explicado acima. Para os dois níveis mais baixos de corrente, quanto maior a corrente, maior aceleração média das gotas, fato que também justifica a grande diferença entre as V_{CHE} de suas gotas. Já em 300 A, o comportamento parece ser dependente de outros fatores. Em arcos curtos e médios, a aceleração é muito pequena (chegando a ser negativa, ou seja, algumas gotas são freadas), o que pode justificar a razão da V_{CHE} para estes arcos a 300 A ser próximo da V_{CHE} do arco a 250 A. Em arcos mais longos, a aceleração já assume os mais altos valores, proporcionado diferença de V_{CHE} em relação ao mesmo arco a 250 A. A explicação para tal fato não é absolutamente clara (similar a um efeito repulsivo mais pronunciado dos jatos de vapores metálicos quando a corrente é alta e o comprimento do arco é baixo).

Tabela 5.6 – Aceleração média: medidas, médias e resultado da ANOVA ($A_{MED} - I \times$ Comprimento do arco (DBCP)).

Corrente (A)	200			250			300			
	Arco	Curto	Médio	Longo	Curto	Médio	Longo	Curto	Médio	Longo
Medidas		8,40	9,80	34,0	-80,0	193,4	115,6	-42,8	30,0	-111,0
		0,20	15,8	25,6	7,60	46,8	104,6	-153,2	88,0	453,6
		20,4	9,60	32,0	150,0	61,0	39,0	-4,60	-19,6	335,4
		12,6	17,2	19,2	76,0	55,4	50,2	-26,4	56,8	11,6
		39,2	13,2	20,6	34,0	53,6	39,2	-52,0	75,2	-28,8
		-0,40	15,8	34,8	15,4	60,8	54,0	-5,00	-5,60	-23,2
		59,2	15,2	44,0	223,2	95,4	140,2	28,8	66,8	223,0
		14,8	15,6	51,8	141,0	102,8	60,6	90,0	90,8	120,0
		14,8	17,2	17,6	84,8	111,6	66,6	-20,0	89,4	71,6
Média	18,8	14,4	31,1	72,4	86,8	74,4	-20,6	52,4	116,9	
Nível de significância	p = 0,04			p = 0,87			p = 0,06			

Tabela 5.7 – Aceleração média: medidas, médias e resultado da ANOVA ($A_{MED} - DBCP \times I$).

Arco	Curto			Médio			Longo			
	Corrente	200	250	300	200	250	300	200	250	300
Medidas		8,4	-80,0	-42,8	9,8	193,4	30,0	34,0	115,6	-111,0
		0,2	7,6	-153,2	15,8	46,8	88,0	25,6	104,6	453,6
		20,4	150,0	-4,6	9,6	61,0	-19,6	32,0	39,0	335,4
		12,6	76,0	-26,4	17,2	55,4	56,8	19,2	50,2	11,6
		39,2	34,0	-52,0	13,2	53,6	75,2	20,6	39,2	-28,8
		-0,4	15,4	-5,0	15,8	60,8	-5,6	34,8	54,0	-23,2
		59,2	223,2	28,8	15,2	95,4	66,8	44,0	140,2	223,0
		14,8	141,0	90,0	15,6	102,8	90,8	51,8	60,6	120,0
		14,8	84,8	-20,0	17,2	111,6	89,4	17,6	66,6	71,6
Média	18,8	72,4	-20,6	14,4	86,8	52,4	31,1	74,4	116,9	
Nível de significância	p = 0,02			p < 0,01			p = 0,27			

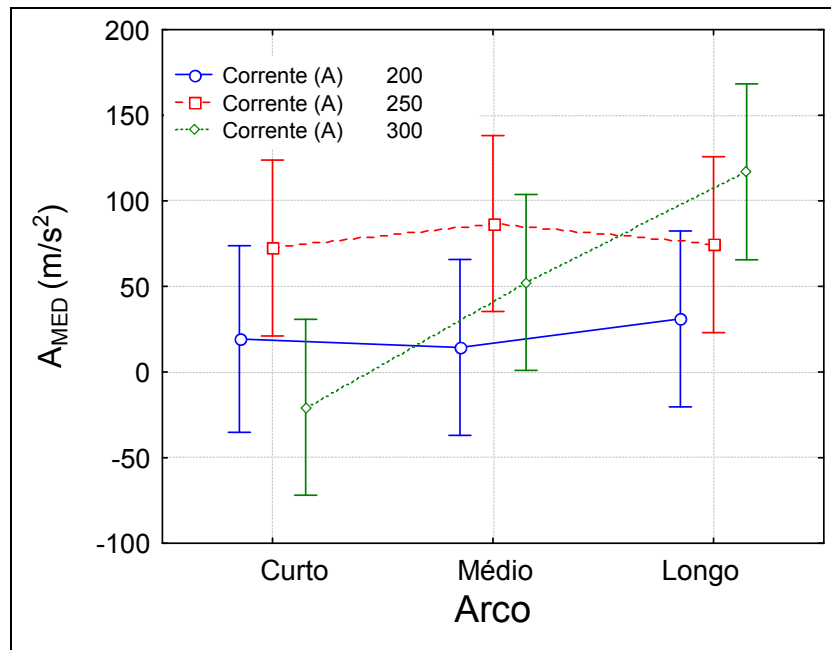


Figura 5.16 – Efeito de “I” e do comprimento do arco sobre “ A_{MED} ”.

5.4 Caracterização Geométrica dos cordões de solda

A Tabela 5.8 apresenta as medidas realizadas da geometria dos cordões de solda, onde “P” é a penetração da solda, “R” é o reforço do cordão e “L” sua largura; “ A_T ” é a área total da seção transversal do cordão de solda, que compreende “ A_{AM} ” (área adicionada medida) e “ A_F ” (área fundida), conforme definido no Capítulo 3.

A Figura 5.17 apresenta as geometrias obtidas nos cordões de solda. Observa-se na maioria dos cordões a formação de uma penetração esbelta, o “finger like”, ao centro da zona fundida, normalmente atribuída pelos pesquisadores ao elevado “momentum” das gotas, que levam mais energia à mistura convectiva no fundo da poça de fusão (Murray & Scotti, 1998). Observa-se que esse comportamento é mais acentuado a maiores correntes e arcos mais curtos.

A Tabela 5.9 apresenta os níveis de significância (p) obtidos pela análise de variância global das variáveis. Observa-se que a corrente provocou mudanças significativas na penetração (P) da solda nos três níveis de comprimento do arco, e vice versa. Observa-se que não houve interação significativa entre os parâmetros, o que pode ser observado na Figura 5.18. Nessa figura, vê-se que as curvas são bastante distintas quanto à sua magnitude, e semelhantes quanto à forma, caracterizando a ausência de interação entre “I” e o comprimento do arco. Observa-se que a penetração aumenta com a corrente, como é esperado, e cai com o aumento do comprimento do arco. Esse comportamento pode ser devido a variações na posição em que a gota atinge a poça de fusão. Talvez, com o aumento do arco, as gotas

passem a incidir mais sobre a parte posterior da poça, próximo ao cordão de solda, que no centro da mesma, ou sobre a parte próxima ao metal base diante da poça. Isso também pode justificar o comportamento apresentado na Figura 5.17, com uma redução aparente do formato esbelto (“finger like”) normalmente atribuído à incidência das gotas no centro da poça.

Tabela 5.8 – Geometria dos cordões de solda: medidas realizadas.

Teste	I (A)	Arco	DBCP (mm)	P (mm)	R (mm)	L (mm)	A_T (mm ²)	A_{AM} (mm ²)	A_F (mm ²)
A		Curto	18	1,34	2,64	10,56	26,07	17,76	8,31
				1,79	2,76	11,72	31,63	21,47	10,17
				1,05	1,08	10,40	25,63	19,11	6,52
B	200	Médio	22	0,47	2,76	9,69	20,07	16,45	3,62
				0,63	3,01	14,12	30,22	26,51	3,71
				0,91	2,70	16,00	29,56	22,32	7,24
C		Longo	26	0,96	3,28	13,34	32,37	28,76	3,60
				0,49	2,50	7,89	15,95	13,02	2,93
				0,21	3,17	14,16	30,57	27,42	3,14
D		Curto	18	2,73	2,89	10,52	33,91	20,43	13,48
				2,83	2,63	10,13	31,47	17,77	13,70
				2,68	2,88	10,33	33,27	19,43	13,84
E	250	Médio	22	2,24	2,85	9,76	30,85	20,28	10,57
				2,41	2,91	10,11	32,66	20,97	11,69
				1,93	2,97	9,68	27,93	17,85	10,08
F		Longo	26	1,62	2,84	9,81	26,45	17,65	8,80
				1,98	3,36	9,98	33,19	23,39	9,79
				1,53	3,38	9,90	29,83	21,63	8,20
G		Curto	18	3,61	3,38	10,23	40,52	23,33	17,18
				3,58	3,32	9,99	40,00	20,48	19,51
				3,57	2,97	9,48	34,26	16,69	17,57
H	300	Médio	22	2,84	2,87	10,50	33,82	20,41	13,41
				2,75	3,21	9,90	33,84	20,82	13,02
				2,50	3,09	9,02	29,33	19,88	9,45
I		Longo	26	2,63	3,06	10,92	37,21	24,65	12,57
				2,66	4,47	9,99	43,80	31,36	12,44
				2,27	2,79	10,18	30,48	19,69	10,78

Na Figura 5.19 vê-se que ao arco curto, o reforço do cordão (R) na soldagem com 300 A foi o responsável pela diferença significativa entre as médias e que há uma tendência de aumento de reforço com o aumento do comprimento do arco nas correntes de 200 e 250 A. Para a corrente de 300 A não foi observada uma tendência definida para o comportamento do reforço do cordão de solda.

A largura do cordão de solda (L), como pode ser visto na Tabela 5.9, é afetada significativamente apenas pela corrente de soldagem. Na Figura 5.20 pode-se observar que para arcos curtos existe uma diferença proeminente da soldagem com 200 A para as demais. Provavelmente isto foi responsável pelo resultado significativo da análise de variância.

A área total (A_T) do cordão de solda foi afetada significativamente somente pela corrente de soldagem, de acordo com a Tabela 5.9. Na Figura 5.21 observa-se que o efeito da corrente sobre A_T é mais pronunciado para arcos curtos e médios. Essa variável (A_T) é composta por outras duas, a área adicionada (A_{AM}) e a área fundida (A_F). Pela Tabela 5.9, observa-se que a área adicionada não sofreu influência dos parâmetros de soldagem. O comportamento apresentado por essa variável é esperado, uma vez que se manteve constante a relação entre a velocidade de alimentação do eletrodo e a velocidade de soldagem (V_a/V_s) em todos os experimentos, muito embora se possa observar alguma variância entre as medidas realizadas de cada experimento na Tabela 5.8. Já a área fundida do cordão de solda (A_F), de acordo com a Tabela 5.9, foi afetada significativamente pela corrente de soldagem e comprimento do arco. Na Figura 5.22, observa-se que “ A_F ” aumenta com a corrente de soldagem, bem como diminui com o comprimento do arco, e que não há interação entre os parâmetros. Isso, assim como o comportamento da penetração da solda, fornece indícios de que com o aumento do comprimento do arco as gotas passem a incidir sobre uma parte mais viscosa da poça de fusão, dificultando o carregamento de energia por parte das mesmas até o fundo da poça, o que justificaria o resultado apresentado. Também uma maior perda da energia gerada no arco voltaico reduziu a área fundida das soldas realizadas com arcos maiores, mesmo que estes possam eventualmente apresentar maior valor calculado de energia de soldagem.

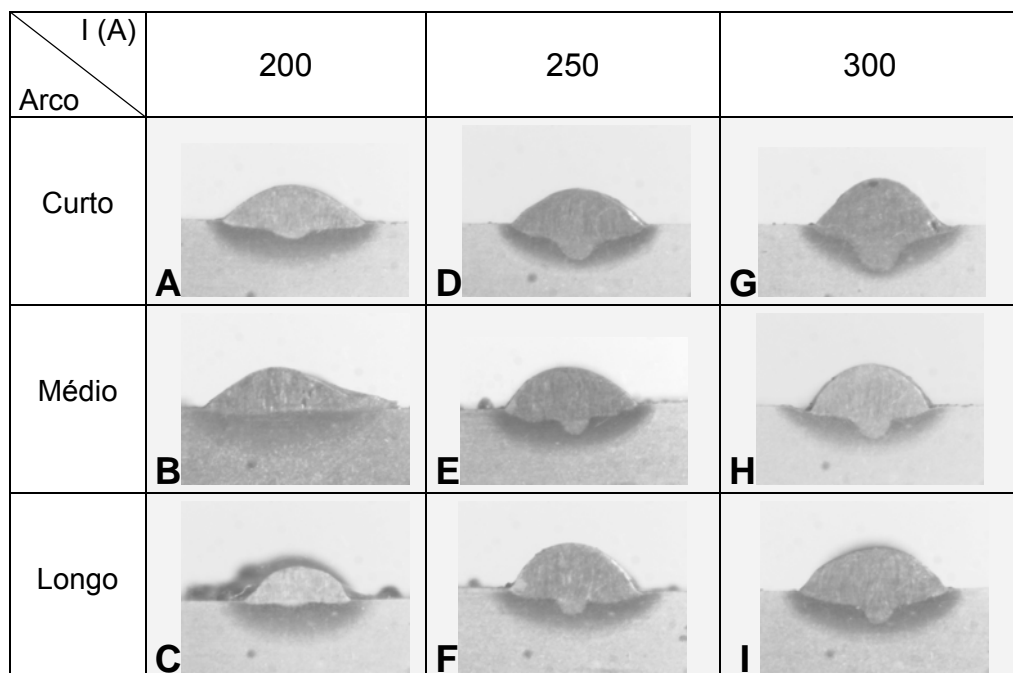


Figura 5.17 – Geometria obtida nos cordões de solda.

Tabela 5.9 – Níveis de significância “p” obtidos pela ANOVA.

Variáveis Fatores	P	R	L	A _T	A _{AM}	A _F
I	0,00	0,06	0,04	0,01	0,55	0,00
Comp. Arco	0,00	0,20	0,84	0,43	0,22	0,00
I x Comp. Arco	0,84	0,85	0,64	0,83	0,92	0,33

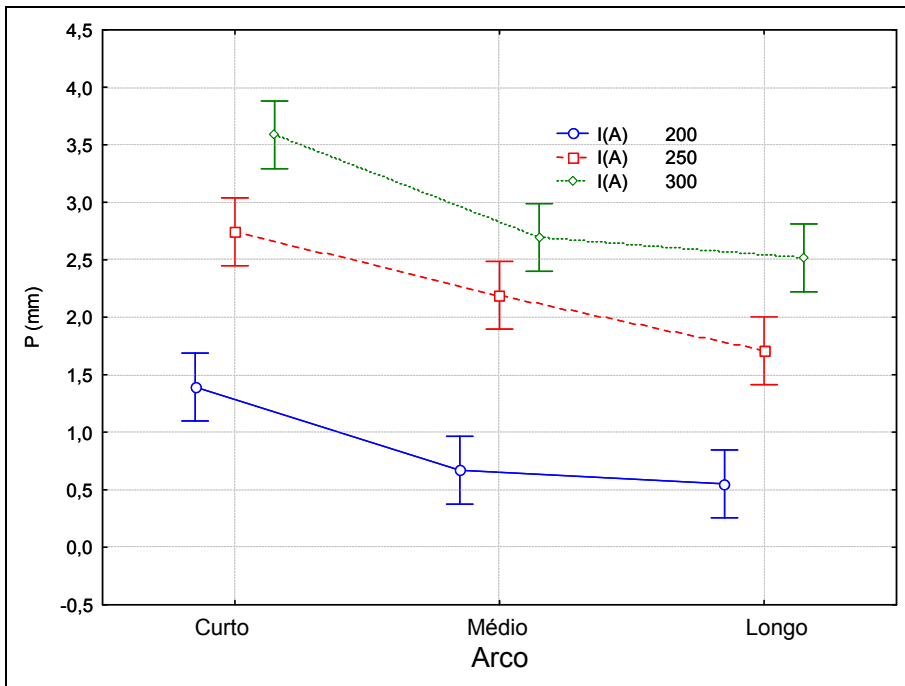


Figura 5.18 – Efeito de “I” e do comprimento do arco sobre a penetração.

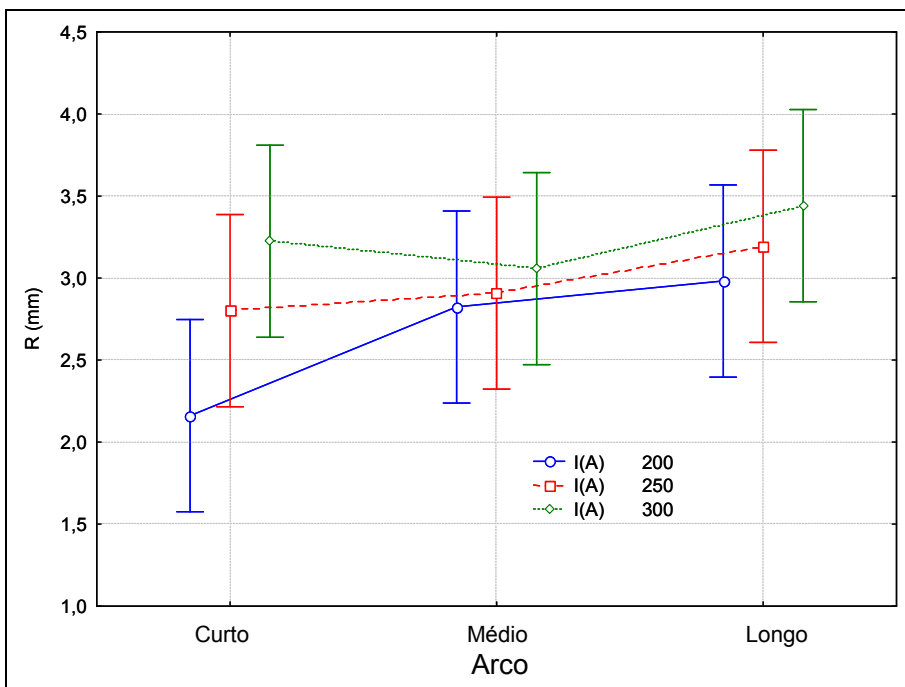


Figura 5.19 – Efeito de “I” e do comprimento do arco sobre o reforço.

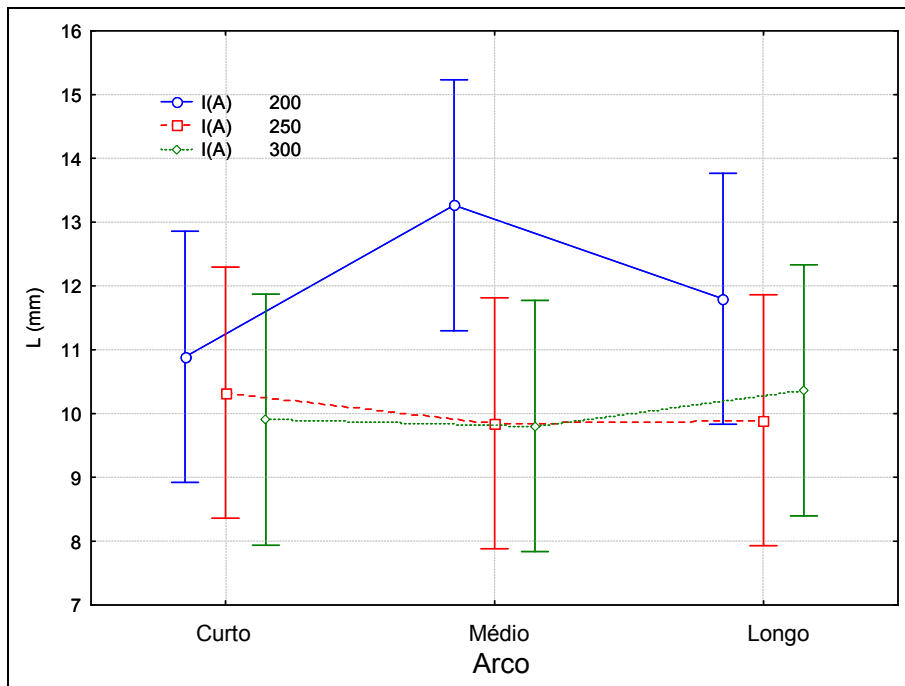


Figura 5.20 – Efeito de “I” e do comprimento do arco sobre a largura.

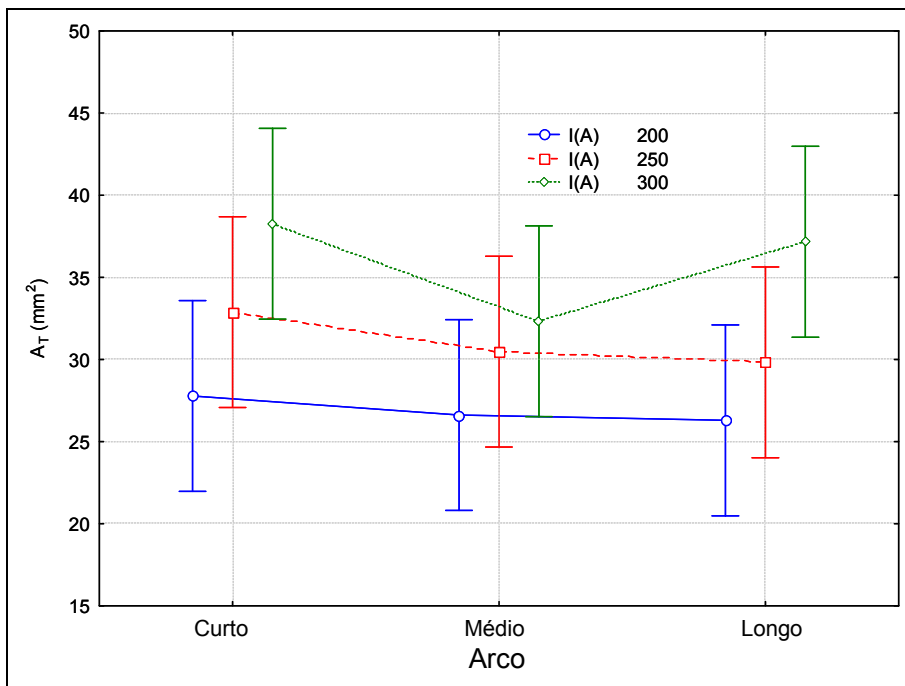


Figura 5.21 – Efeito de “I” e do comprimento do arco sobre a área total da solda.

Ressalta-se que as discussões do efeito da corrente sobre as características geométricas do cordão foram feitas à luz da condição de uma relação V_a/V_s constante, que nestes experimentos equivale a I/V_s constante. Mesmo com aproximadamente a mesma energia imposta e mesma quantidade de material depositado, o aumento da corrente favoreceu

o aumento na penetração e o aumento do comprimento do arco diminuiu sensivelmente a penetração do cordão de solda.

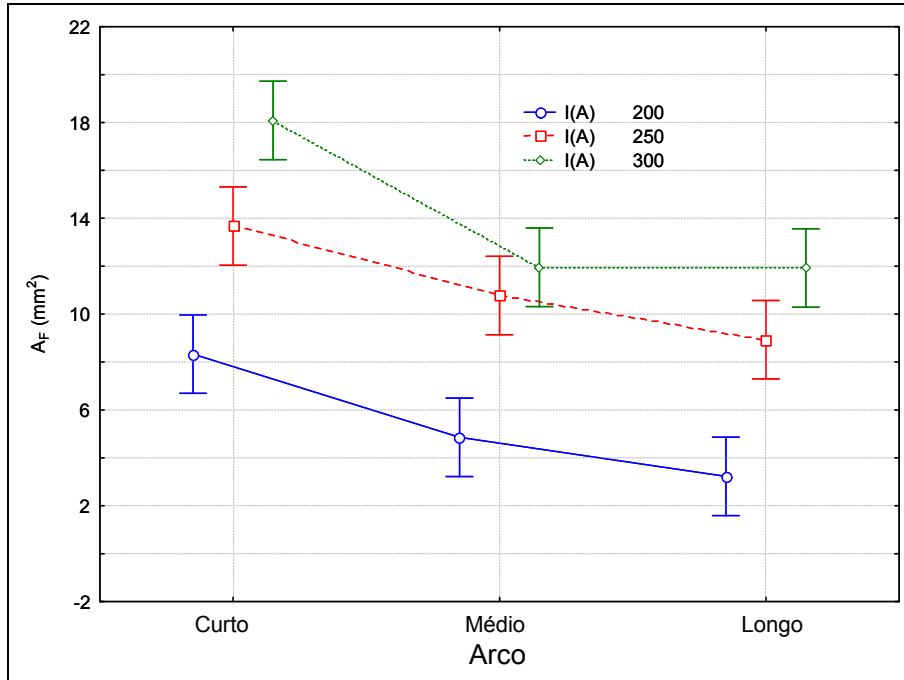


Figura 5.22 – Efeito de “I” e do comprimento do arco (análogo a DBCP) sobre a área fundida.

5.5 Quantidade de Movimento Efetiva das gotas em transferência

A Tabela 5.10 apresenta as características das transferências metálicas e também a Quantidade de Movimento (Q) das gotas, a Taxa de Quantidade de Movimento (T) das gotas e a Quantidade de Movimento Efetiva (Qe) das gotas, obtidas respectivamente através das Equações 3.2, 3.3 e 3.4. Do ponto de vista do efeito da corrente, observa-se que os valores de Q caem, os valores de T aumentam e os valores de Qe aumentam quando se muda o modo de transferência metálica e tendem a cair com o aumento da corrente de soldagem no modo goticular. As alterações nos valores das variáveis dinâmicas da transferência metálica são mais pronunciadas na mudança de 200 para 250 A, onde há mudança no modo de transferência metálica de globular para goticular. Observa-se, conforme citado anteriormente, que a frequência da transferência (f) e a velocidade de chegada (V_{CHE}) das gotas também aumentam com a corrente. Este fato dá a entender que a maior dimensão (diâmetro, massa) apresentada pelas gotas na transferência globular não é o parâmetro principal, como se poderia supor baseado no fato de que características dinâmicas são proporcionais ao cubo do diâmetro de cada gota (Equação 3.2). Entretanto, as maiores frequências de destacamento (mesmo que à custa de menores diâmetros) e maiores velocidades de chegada das gotas à poça nas soldagens com transferência goticular é que proporcionam, por exemplo, as maiores Taxas de

Quantidade de Movimento (T). Quando da mudança de 250 para 300 A, o crescimento de T com a corrente é menos pronunciado, em função das variações também menos pronunciadas das freqüências, diâmetros e velocidades de chegadas das gotas. Ao ser associado esse valor com a velocidade de soldagem, para compor Q_e , percebeu-se que se tornou ainda mais crítica a mudança no modo de transferência metálica, mas que em transferência goticular não ocorreu o efeito intuitivamente esperado para um aumento da corrente de soldagem, que seria o aumento de Q_e . Este fato está associado ao aumento proporcional de V_s (velocidade de soldagem), que entra como divisor na composição de Q_e , como descrito na Equação 3.4. Salienta-se que, nas condições dadas, e do ponto de vista das características da transferência metálica, o aumento de V_s foi mais crítico que a redução dimensional das gotas e o aumento da freqüência na composição da variável Q_e .

Procurou-se também traçar a relação entre estas variáveis dinâmicas e a penetração das soldas (Figura 5.23, Figura 5.24 e Figura 5.25). Chamam-se a atenção para o fato que estas figuras retratam um efeito combinado e concorrente entre a intensidade de corrente (I), comprimento de arco (a) e a Quantidade de Movimento Efetiva das gotas, respectivamente. Então, para se tentar chegar a uma melhor noção desta combinação de efeitos, os parâmetros I, a e Q_e foram normalizados (variando-se entre -1 e 1), conforme mostra a Tabela 5.11 e procedeu-se uma regressão múltipla linear com estes parâmetros e a penetração dos cordões de solda, obtendo-se como resultado a Equação 5.1. A Tabela 5.11 ainda apresenta os valores preditos com esta equação e os observados (apresentados no item 5.4).

$$P = 1,908 + 0,789*I - 0,577*a + 0,237*Q_e \quad 5.1$$

Tabela 5.10 – Características da transferência e as características dinâmicas das gotas

Teste	I_{REG} (A)	DBCP (mm)	a (mm)	d (mm)	f (Hz)	V_{CHE} (m/s)	$Q \times 10^{-4}$ (kg.m.s ⁻¹)	$T \times 10^{-4}$ (N)	Q_e (kg/s)
A	200	18	3,9	2,2	14	0,48	0,20	2,81	0,059
B		22	9,0	1,8	16	0,66	0,15	3,01	0,063
C		26	14,5	1,5	32	0,82	0,11	3,48	0,072
D	250	18	3,7	1,1	211	1,03	0,05	11,35	0,167
E		22	9,3	1,1	172	1,26	0,07	11,29	0,166
F		26	13,2	1,0	210	1,34	0,05	11,07	0,163
G	300	18	4,7	0,8	548	1,13	0,02	12,42	0,149
H		22	9,5	0,8	520	1,29	0,03	13,48	0,162
I		26	12,3	0,7	525	1,79	0,02	12,65	0,152

A Figura 5.26 apresenta os valores da penetração da solda preditos pela Equação 5.1 versus os valores obtidos experimentalmente. O coeficiente de correlação obtido

para estes pontos foi de 0,94. A confiabilidade desta abordagem não pode ser considerada alta, uma vez que as variáveis dinâmicas não são ortogonais, dada a sua natureza experimental. Mas pode-se entender que o peso da corrente e o do comprimento de arco sobre a penetração da solda são maiores que o de Q_e na composição do valor de penetração do cordão predito pela Equação 5.1. Do ponto de vista físico, esses coeficientes não tem a qualificação de bons preditores, mas fornecem um indício razoável da maior ou menor dependência da resposta P em relação a cada um dos fatores. Assim, com base no resultado apresentado na Figura 5.24, bem como na correlação apresentada na Equação 5.1, pode-se afirmar que o efeito de Q_e pode não ser o mais significativo na formação da penetração, mas que é relativamente alto para também governar este fenômeno.

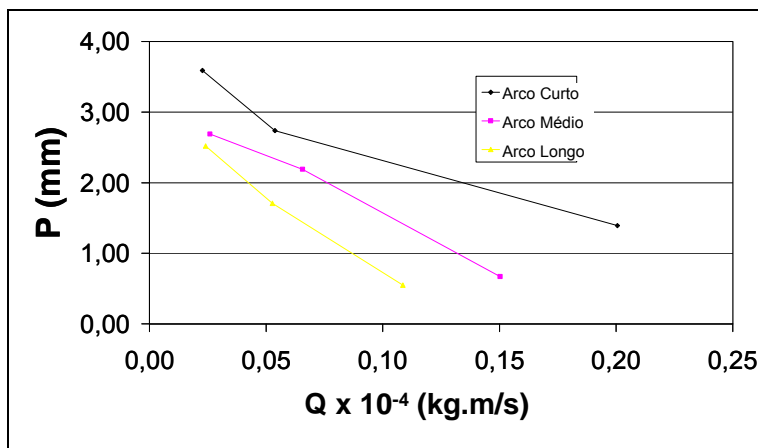


Figura 5.23 – Efeito da Quantidade de Movimento das gotas impingindo na poça de fusão sobre a penetração.

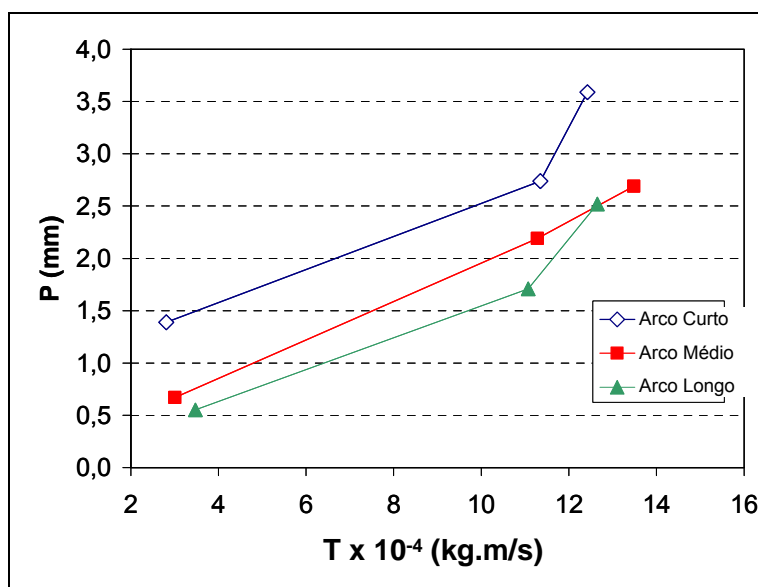


Figura 5.24 – Efeito da taxa de quantidade de movimento das gotas sobre a penetração do cordão de solda.

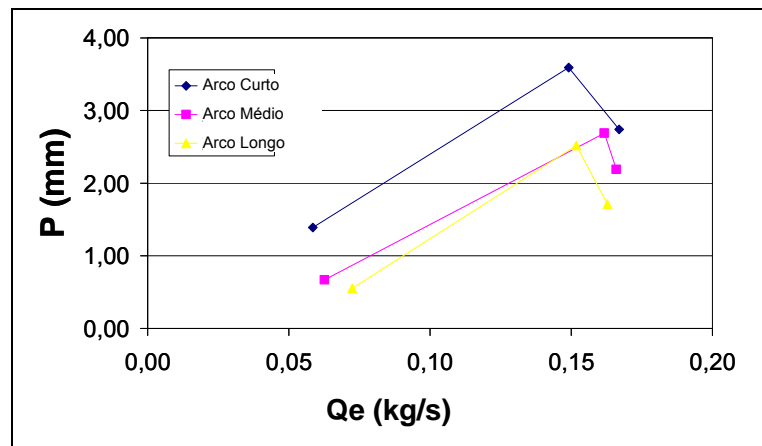


Figura 5.25 – Efeito da Quantidade de Movimento Efetiva das gotas impingindo na poça de fusão sobre a penetração.

Tabela 5.11 – Valores normalizados de I, a, Qe; valores preditos e observados de P.

I(A)	a (mm)	Qe (kg/s)	P pela Eq 5.1 (mm)	P (mm)
-1	-1,0	-1,0	1,40	1,34
-1	-1,0	-1,0	1,40	1,79
-1	-1,0	-1,0	1,40	1,05
-1	0,0	-0,9	0,88	0,47
-1	0,0	-0,9	0,88	0,63
-1	0,0	-0,9	0,88	0,91
-1	1,0	-0,7	0,34	0,96
-1	1,0	-0,7	0,34	0,49
-1	1,0	-0,7	0,34	0,21
0	-1,0	1,0	2,76	2,73
0	-1,0	1,0	2,76	2,83
0	-1,0	1,0	2,76	2,68
0	0,0	1,0	2,15	2,24
0	0,0	1,0	2,15	2,41
0	0,0	1,0	2,15	1,93
0	0,8	0,9	1,72	1,62
0	0,8	0,9	1,72	1,98
0	0,8	0,9	1,72	1,53
1	-0,8	0,7	3,35	3,61
1	-0,8	0,7	3,35	3,58
1	-0,8	0,7	3,35	3,57
1	0,1	0,9	2,90	2,84
1	0,1	0,9	2,90	2,75
1	0,1	0,9	2,90	2,50
1	0,6	0,7	2,55	2,63
1	0,6	0,7	2,55	2,66
1	0,6	0,7	2,55	2,27

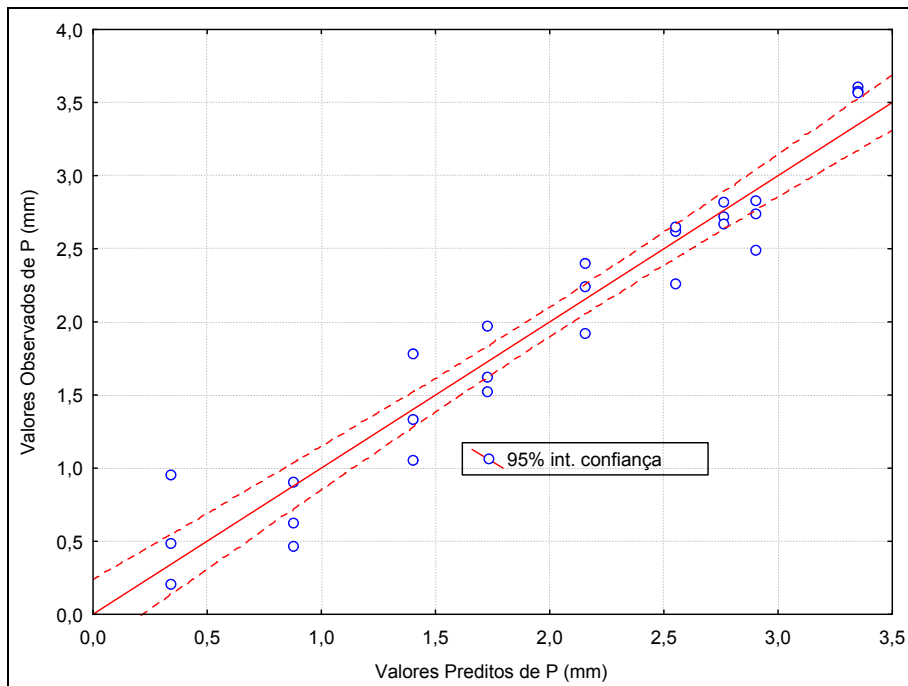


Figura 5.26 – Penetração predita pela Equação 5.1 versus valores experimentais ($R^2 = 0,94$).

5.6 Conclusões Parciais

Tendo em vista as condições empregadas neste capítulo (soldagem com eletrodos de aço carbono, posição plana, fonte no modo corrente constante, etc.), conclui-se que:

5.6.1. Relacionando-se os parâmetros de entrada (corrente e comprimento do arco) com as características cinemáticas:

- A corrente de soldagem e o comprimento do arco de soldagem influenciam a velocidade de chegada da gota à poça de fusão: quanto maiores, maior a velocidade de chegada;
 - O efeito da corrente de soldagem sobre a velocidade de chegada da gota à poça de fusão é mais pronunciado quando se passa de um corrente com transferência globular para uma corrente com transferência goticular;
 - O efeito do comprimento do arco sobre a velocidade de chegada da gota à poça de fusão é pronunciado independentemente do tipo de transferência;
- A corrente e comprimento do arco influenciam a aceleração média da gota:
 - De forma interdependente: o comprimento do arco só afeta a aceleração média das gotas ao maior nível de corrente;
 - A corrente só afeta a aceleração média das gotas em comprimentos de arco curto e médio;

5.6.2. Relacionando os parâmetros de entrada (corrente e comprimento de arco) com as características dinâmicas:

- O aumento da corrente de soldagem:
 - Aumenta a quantidade de movimento efetiva das gotas apenas quando associada à mudança do modo de transferência de globular para goticular (não aumenta quando já em goticular);
- O aumento do comprimento do arco:
 - Aumenta a quantidade de movimento efetiva no modo globular de transferência metálica (não influencia claramente as características dinâmicas das gotas em transferência no modo goticular de transferência metálica).

5.6.3. Relacionando os parâmetros de entrada (corrente e comprimento do arco) com as características geométricas dos cordões:

- O aumento da corrente de soldagem:
 - Aumenta a penetração do cordão de solda e a sua área fundida, bem como modifica a convexidade do cordão de solda, mesmo que este aumento seja compensado pelo aumento da velocidade de soldagem, procurando-se manter a mesma área adicionada esperada (aproximadamente mesmo calor imposto);
- O aumento do comprimento do arco:
 - Diminui a penetração do cordão de solda e sua área fundida, mesmo mantendo-se a mesma área adicionada esperada (aproximadamente mesmo calor imposto);

5.6.4. Relacionando as características dinâmicas e a geometria do cordão de solda:

- O aumento da quantidade de movimento efetiva das gotas em transferência aumenta a penetração das soldas quando se passa do modo globular para o goticular de transferência metálica;
- A quantidade de movimento efetiva das gotas afeta a penetração das soldas de forma menos marcante que a corrente e o comprimento do arco de soldagem.

Capítulo 6

6. Avaliação cinemática e dinâmica da transferência metálica em MIG/MAG com arame eletrodo de alumínio

6.1 Planejamento Experimental

Similarmente ao Capítulo 5, a proposta metodológica deste capítulo é estudar as características cinemáticas e dinâmicas da transferência metálica no processo MIG/MAG utilizando-se eletrodo de alumínio, sob a influência da variação da intensidade da corrente média e do comprimento do arco voltaico. O material para este capítulo foi escolhido devido às suas propriedades físicas, tal como sua massa específica e resistividade, notadamente inferiores que as do eletrodo de aço. Optou-se por usar três níveis de corrente e, devido à dificuldade operacional em se soldar MIG/MAG de alumínio com arcos maiores foram utilizados apenas duas DBCP, equivalendo a 2 comprimentos distintos de arco. Utilizou-se arame eletrodo classe AWS ER AL4043 com diâmetro 1,2 mm, chapas de alumínio da série 5000 (250 x 6,35 x 50 mm) e argônio puro como gás de proteção. Foi utilizada uma pistola tipo “push-pull”, diferente da convencional utilizada nas soldagens com aço. A pistola de soldagem foi inclinada em 15° na direção empurrando (Figura 6.1) (cordão de solda do lado agudo, região a ser soldada do lado obtuso), com o intuito de proteger contra a oxidação a região à frente da solda. A Tabela 6.1 apresenta o planejamento experimental, enquanto a Tabela 6.2 apresenta além dos valores de regulagem, os valores monitorados durante os ensaios (amostras de 5 s, frequência de 10 kHz e resolução de 12 bits).

A Figura 6.2 mostra as características estáticas dos arcos obtidos, onde se observa comportamento absolutamente linear para o arco mais curto (DBCP = 18 mm). Já para arcos maiores (DBCP de 22 mm), vê-se um comportamento contrário ao apresentado no Capítulo 5 e na literatura (Modenesi & Reis, 2005; Costa, 2003; Bingul, 1996), obtido com eletrodos de aço carbono. Tal comportamento pode ser aceitável para o alumínio, dada sua baixa resistividade elétrica, o que tornaria, no modo globular, sua gota uma parte insignificante no circuito bico-eletrodo-gota-arco-poça, tal como descrito por Ponomarev et al. (2002). Soldagens com alumínio são desafiadoras a algumas teorias consolidadas para materiais de maior resistividade elétrica. Muitas vezes, apresentam inclusive valores negativos para os coeficientes da equação do consumo do eletrodo, o que levaria a supor que alguma parcela do consumo pode diminuir com o aumento da corrente. Este comportamento é normalmente atribuído à forma estocástica de obtenção destes coeficientes.

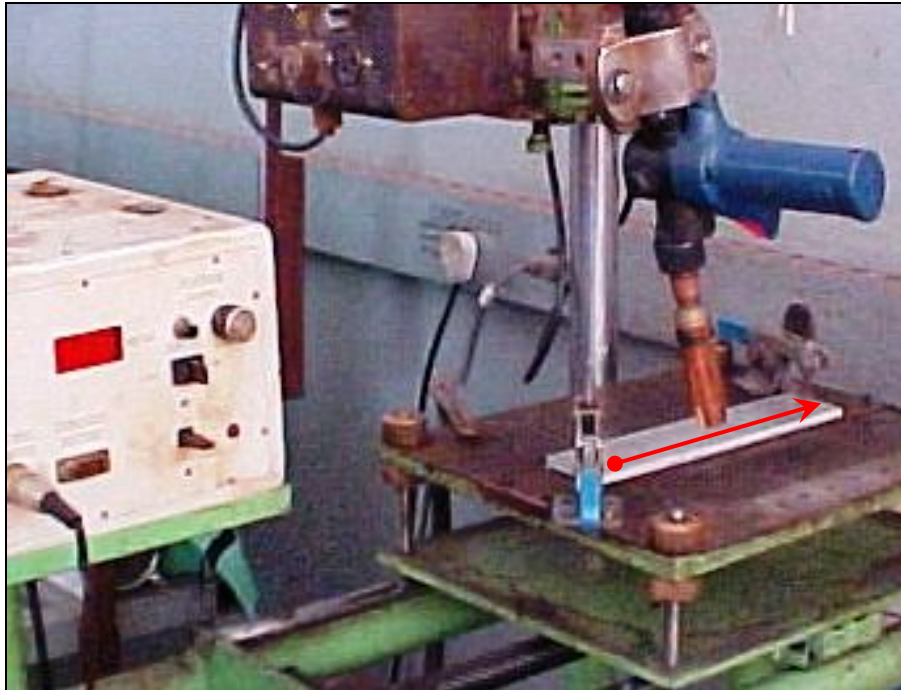


Figura 6.1 – Pistola tipo “push-pull” inclinada de 15° na direção “empurrando”.

Tabela 6.1 – Planejamento experimental para soldagens com diferentes comprimentos de arco e níveis de corrente.

I_{REG} (A)	DBCP (mm)
130	18
	22
180	18
	22
230	18
	22

Tabela 6.2 – Parâmetros de regulagem para as soldagens e valores monitorados.

I_{REG} (A)	Valores de Regulagem			Valores Monitorados	
	DBCP (mm)	V_a (m/min)	V_s (cm/min)	I_M (A)	U_M (V)
130	18	5,5	38,5	139	24,9
	22			136	26,2
180	18	7,5	52,5	181	26,0
	22			183	28,3
230	18	9,0	63	230	27,1
	22			225	28,9