

CAPÍTULO V

INFLUÊNCIA DA CORRENTE NO ARCO EXTERNO SOBRE A FAIXA DE CORRENTE DE TRANSIÇÃO GLOBULAR-GOTICULAR, TAXA DE FUSÃO DO ELETRODO CONSUMÍVEL E PARÂMETROS CINEMÁTICOS DAS GOTAS EM TRANSFERÊNCIA

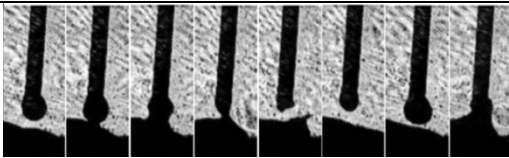
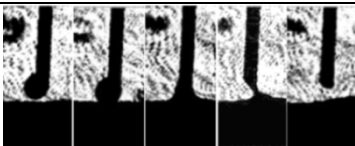
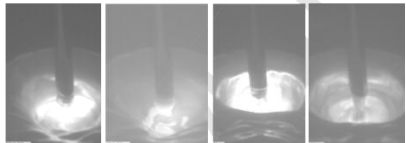
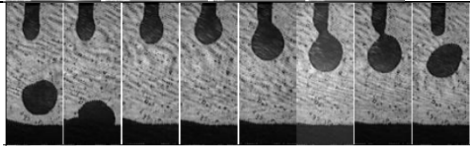
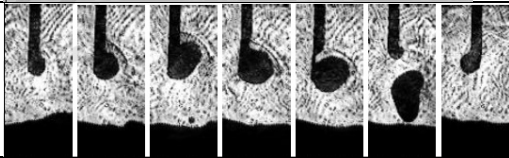
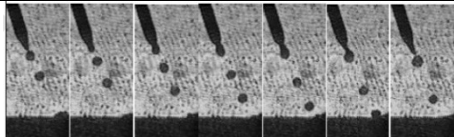
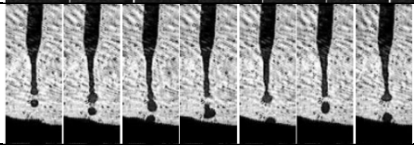
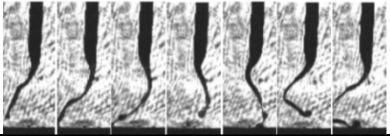
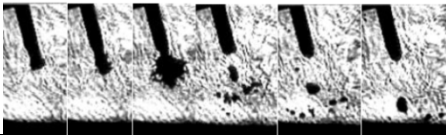
5.1 Introdução

A maneira com que o metal é transferido da ponta do eletrodo consumível até a poça de fusão tem grande influência sobre o desempenho do processo MIG/MAG, pois afeta a estabilidade do processo, a geração de respingos, a qualidade da solda e a capacidade de realização de soldas fora da posição plana (NORRISH, 1992 p.131). Diferentes modos de transferência metálica podem ser observados no processo MIG/MAG, associados a fatores tais como os parâmetros elétricos (tensão, corrente e polaridade), materiais, gases de proteção, distância do bico de contato à peça (DBCP), características da fonte, etc. (VILARINHO, 2007). Esses modos de transferência podem ser classificados dentro de dois grupos principais: transferência em voo livre e por curto-circuito. Na transferência por voo livre, um arco é mantido entre a ponta do eletrodo e a peça e o metal é transferido através do arco na forma de gotas. Tamanho e frequência das gotas em transferência podem variar e diversas subdivisões são necessárias para acomodar essas variações (NORRISH, 1992).

De acordo com Scotti et al. (2012), recentemente os membros do IIW chegaram a um consenso sobre uma classificação simples dos modos de transferência metálica com duas classes, a saber, "Transferência Metálica Natural" e "Transferência Metálica Controlada". Ainda de acordo com esses autores, uma adicional terceira classe deveria existir, a qual foi denominada por eles como "Modos de Transferência Intercambiáveis". Esse modo de transferência se caracteriza por cobrir transferências metálicas em que dois

ou até três modos naturais acontecem durante a soldagem de forma intercalada, sequencial e repetitiva, sem intervenção do operador/soldador ou controle do equipamento. A Tabela 5.1 ilustra os modos de transferência metálica apresentados por Scotti et al. (2012) que acontecem "naturalmente", isto é, as transferências não são forçados por parâmetros elétricos adicionais ou por controle na alimentação do arame.

Tabela 5.1 – Modos de transferência metálica na soldagem MIG/MAG (Scotti et al., 2012)

Grupo de modos	Modo de Transferência	Visualização	Principal força governante (Efeito)
Transferência por contato	Curto-Circuito		Tensão superficial e efeito Pinch (eletro-magnético)
	Em Ponte		Tensão Superficial
	Curto-Circuito forçado		Efeito Pinch fortemente pronunciado
Transferência por voo livre	Globular		Força gravitacional
	Globular repelida		Força gravitacional e forças de repelimento
	Goticular		Forças eletro-magnéticas
	Goticular com alongamento		
	Goticular rotacional		
	Explosiva		Forças eletro-magnéticas e reações químicas

A Transferência Globular é típica da soldagem com correntes baixas a moderadas, porém com tensões mais elevadas. O metal de adição se destaca do eletrodo e é transferido para a poça de fusão basicamente por ação gravitacional. Com esta forma de transferência, um elevado nível de respingos e instabilidades do arco é comum e a operação está restrita à posição plana.

A transferência Goticular (*Spray*) é típica de altas tensões e correntes de soldagem (acima da corrente de transição globular – goticular, que será apresentada em seguida). O metal se transfere na forma de pequenas gotas com diâmetro aproximadamente igual ao do eletrodo, sob a ação de intensas forças eletromagnéticas. É um modo de transferência estável, livre de respingos e de alta produção. No entanto, devido às altas correntes, as soldagens fora da posição plana e de chapas finas tornam-se praticamente impossíveis.

A corrente de transição globular-goticular é uma estreita faixa de corrente onde ocorrem mudanças no modo de formação da gota, passando de grandes gotas em baixa frequência a pequenas gotas em alta frequência. O valor da corrente de transição é função do material, diâmetro e comprimento do eletrodo, assim como do gás de proteção e da DBCP. Na Figura 5.1, Resende et al. (2010) ilustram a mudança do modo de transferência, passando pela transição globular–goticular, em função da variação no valor da corrente. Lancaster (1986) observou um significativo aumento na luminosidade do arco na corrente de transição, sugerindo um aumento significativo na formação de vapor metálico e temperaturas próximas ao ponto de ebulição.

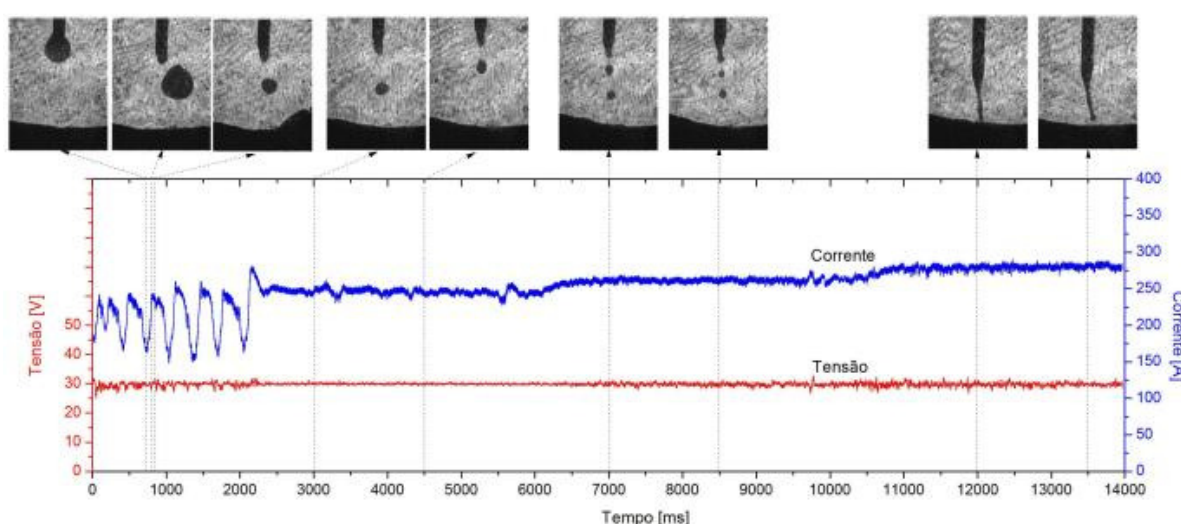


Figura 5.1– Modos de transferência em função da corrente para eletrodo ER70S-6, 1,2 mm, DBCP de 18 mm e Ar+CO₂ (RESENDE; KEOCHEGUERIAN; VILARINHO, 2010)

Lowke (2009) propôs uma equação para determinar a transição entre os modos globular e goticular. Para o autor, a transição ocorre quando a pressão exercida na base da

gota em formação devido às forças eletromagnéticas excede as forças devido a tensão superficial. Este valor de corrente foi estimado pela equação:

$$I = 2. \pi. (\gamma. D / \mu_0)^{1/2} \quad (\text{Equação 5.1})$$

onde D é o diâmetro do arame, γ a tensão superficial e $\mu_0 = 1,26.10^{-6} \text{ N.A}^{-2}$. Partindo da equação 5.1, Lowke (2009) calculou os valores da corrente de transição para diferentes diâmetros de eletrodo e os comparou com valores encontrados na literatura, como mostra a Figura 5.2.

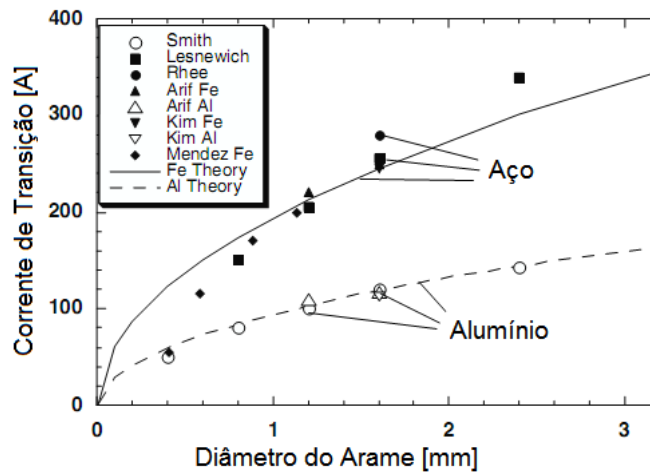


Figura 5.2 – Comparação entre valores previstos pela fórmula e encontrados na literatura (LOWKE, 2009)

Choi et al. (1999), usando análise dimensional, avaliou os fatores que afetam a transferência metálica no processo MIG/MAG. Na transferência metálica, o diâmetro da gota, velocidade e frequência de destacamento são grandezas físicas de interesse, que são influenciadas pelos parâmetros de soldagem e propriedades dos materiais. As grandezas físicas são então expressadas pelos seguintes parâmetros:

$$\phi = f(\rho, \mu, \gamma, I, \mu_0, g, d_w, v_m) \quad (\text{Equação 5.2})$$

onde ρ representa a densidade da gota; μ a viscosidade; γ a tensão superficial; I a corrente de soldagem; μ_0 a permeabilidade; g a gravidade; d_w o diâmetro do eletrodo e v_m a velocidade de fusão do eletrodo.

Os autores então utilizaram os números dimensionais baseados na força devido à tensão superficial para descrever o comportamento da transferência metálica. Então, a equação 5.2 foi reescrita adimensionalmente da seguinte forma:

$$\phi_0 = f(We, Bo, N_{SV}, N_{SE}) \quad (\text{Equação 5.3})$$

onde os índices *S*, *V* e *E* representam respectivamente tensão superficial, viscosidade e forças eletromagnéticas, sendo que as grandezas *We* (Weber), *Bo* (Bond), N_{SV} , N_{SE} representam, respectivamente, os efeitos da taxa de fusão do eletrodo, força gravitacional, viscosidade e força eletromagnética, conforme Equações 5.4 até 5.7.

$$We = \frac{\rho \cdot d_w \cdot v_m^2}{\gamma} \quad (\text{Equação 5.4})$$

$$Bo = \frac{\rho \cdot d_w^2 \cdot g}{\gamma} \quad (\text{Equação 5.5})$$

$$N_{SV} = \frac{\mu \cdot v_m}{\gamma} \quad (\text{Equação 5.6})$$

$$N_{SE} = \frac{\mu_0 \cdot I^2}{d_m \cdot \gamma} \quad (\text{Equação 5.7})$$

Choi et al. (1999) converteram o diâmetro de destacamento e a velocidade em adimensionais e plotaram a relação entre os dois números de acordo com a Figura 5.3. Os resultados indicam que a velocidade das gotas é determinada pelo diâmetro da gota e vice-versa. Por exemplo, quando a corrente de soldagem aumenta, aumenta a força eletromagnética (proporcional a I^2) que deve diminuir o diâmetro da gota, que por sua vez vai resultar em uma maior velocidade de destacamento.

Ainda de acordo com Choi et al. (1999), o número adimensional N_{SE} , que representa a razão entre as forças eletromagnéticas e a da tensão superficial tem os efeitos mais dominantes sobre a transição entre os modos globulares e goticulares.

Rhee e Kannatey-Asibu (1992) avaliaram a transferência metálica no processo MIG/MAG para diversos gases de proteção, a saber: Argônio puro; CO₂; misturas com diferentes proporções de argônio e CO₂; Hélio, conforme a Figura 5.4(A). Os mesmos autores avaliaram a influência da extensão de eletrodo percorrida pela corrente, conforme a Figura 5.4(B). Nas figuras pode ser observada uma faixa de mudança brusca na frequência

de destacamento das gotas numa estreita faixa de corrente (faixa de transição entre os modos globulares e goticular axial).

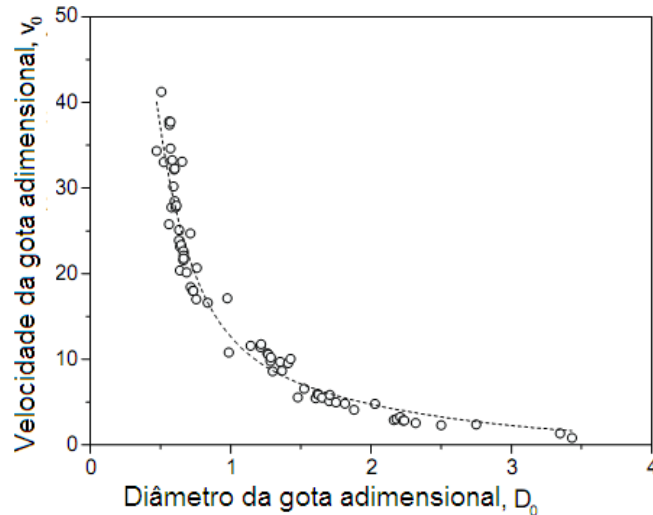


Figura 5.3 – Relação entre os números adimensionais da velocidade de destacamento da gota v_0 (razão entre a velocidade da gota no destacamento e velocidade de alimentação do arame) e diâmetro da gota D_0 (razão entre o diâmetro da gota e o diâmetro do eletrodo) (adaptado de CHOI et al., 1999)

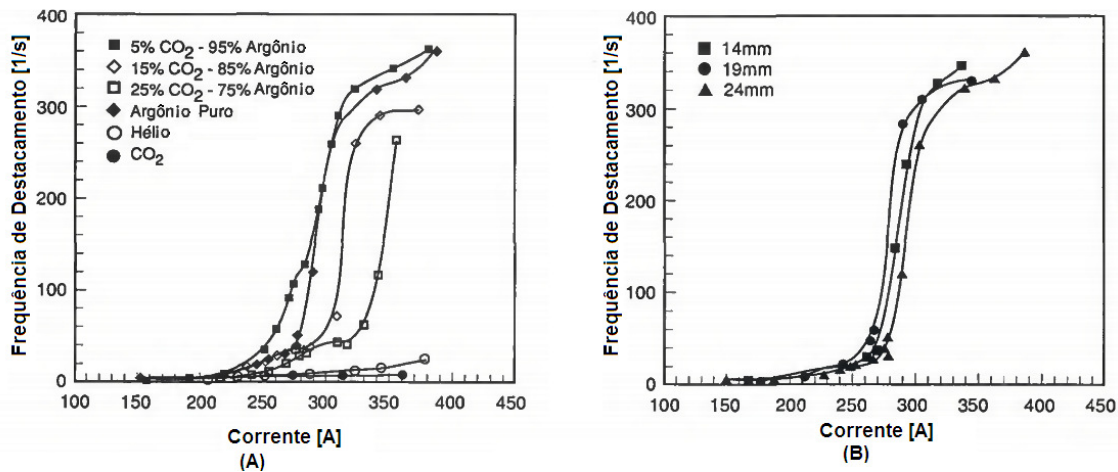


Figura 5.4 – (A) Efeito da corrente e do gás de proteção e (B) efeito da corrente e do comprimento energizado de eletrodo sobre a frequência de destacamento das gotas na soldagem de aço carbono com eletrodo de 1,6 mm de diâmetro (adaptado de RHEE; KANNATEY-ASIBU, 1992)

Rhee e Kannatey-Asibu (1992) obtiveram a aceleração das gotas através da curva de ajuste dos pontos do gráfico 'posição *versus* tempo' (Figura 5.5), a qual foi assumida como sendo de segundo grau, através do método dos mínimos quadrados. A Figura 5.6

mostra os valores medidos e calculados (a partir de equações de outros autores) 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.

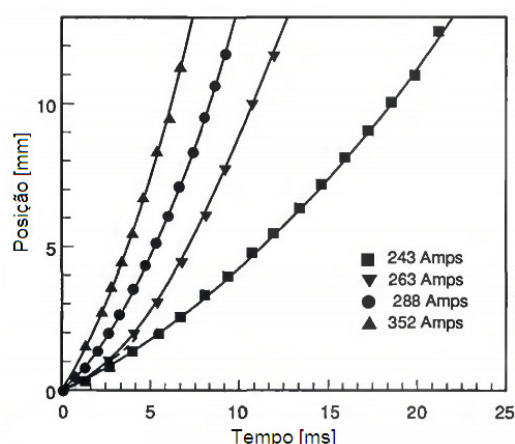


Figura 5.5 - Curvas posição da gota em função do tempo para diferentes valores de corrente (RHEE; KANNATEY-ASIBU, 1992)

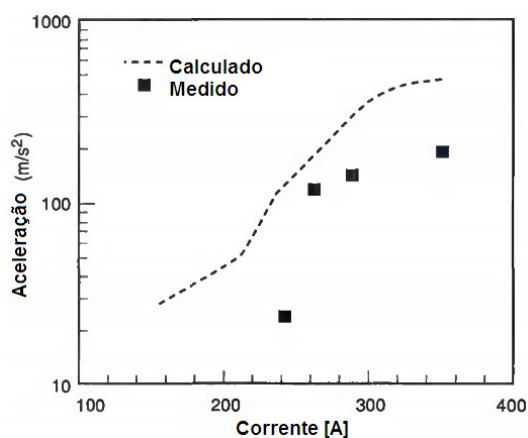


Figura 5.6 - Acelerações médias das gotas durante a trajetória apresentadas por Rhee e Kannatey-Asibu (1992)

Jones et al. (1998), por meio de técnica perfilográfica, 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 determinaram a trajetória de duas gotas consecutivas em cada experimento até a corrente de 280 A e apresentaram suas curvas de ajuste, Figura 5.7(A). A velocidade das gotas durante a trajetória foi apresentada através das curvas de primeira derivada das curvas de ajuste das suas posições, Figura 5.7(B).

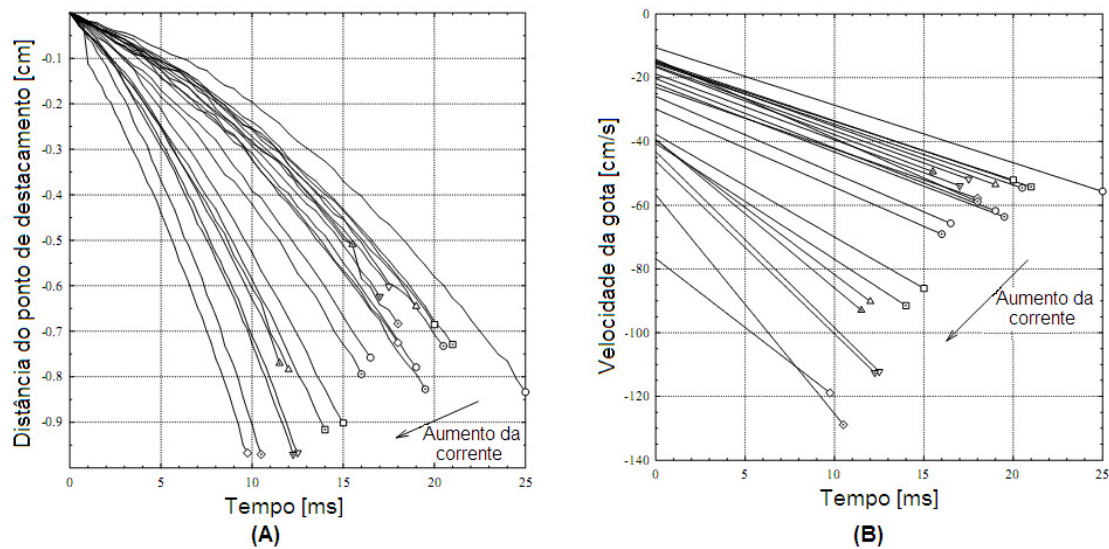


Figura 5.7 – (A) Posição e (B) velocidade das gotas em função do tempo (adaptado de JONES; EAGAR; LANG, 1998)

Também utilizando técnica perfilográfica para filmagem da transferência metálica e posterior determinação de parâmetros cinemáticos, Scotti e Rodrigues (2009a) avaliaram a soldagem MIG/MAG de aço carbono e também de alumínio (SCOTTI; RODRIGUES; 2009b). Os autores usaram o conceito de quantidade de movimento efetivo para quantificar a energia entregue pelas gotas e a relacionaram com a formação do cordão de solda. Como apresentado por Scotti e Rodrigues (2009a), conhecendo o diâmetro da gota (consequentemente, a massa) e a sua velocidade quando colide sobre a poça fundida, é possível determinar a principal característica dinâmica da gota que pode influenciar a formação do cordão, isto é, a quantidade de movimento efetiva, como indicado pela equação 5.8:

$$M_{gota} = \rho \cdot \pi \cdot \frac{d^3}{6} \cdot V_{cheg} \quad [Kg \cdot m \cdot s^{-1}] \quad (\text{Equação 5.8})$$

onde M_{gota} é a quantidade de movimento efetiva da gota, ρ é a densidade, d o diâmetro médio da gota e V_{cheg} a velocidade média da gota chegando à poça de fusão.

Scotti e Rodrigues (2009b) assumiram que uma melhor representação física da gota (movimento de massa de forma intermitente) agindo sobre a poça de fusão seria o produto da quantidade de movimento (M_{gota}) pela frequência (f), que as mesmas atingem a poça. Este parâmetro é representado na Equação 5.9 e foi denominado de Taxa de

quantidade de movimento (M_{rate}). A unidade de M_{rate} indica que ele representa a força com que a gota atinge a poça fundida.

$$M_{rate} = M_{gota} \cdot f \quad [Kg.m.s^{-2} = N] \quad (\text{Equação 5.9})$$

No entanto, M_{rate} é uma força discreta. O efeito das gotas na poça de fusão deveria ser traduzido pelo tempo em que esta atua em uma mesma área. Assim, se esta quantidade mencionada é dividida pela velocidade de soldagem (V_{sold}) chega-se ao parâmetro que foi denominado por Scotti e Rodrigues (2009b) como Quantidade de Movimento Efetivo (M_E), conforme definido pela Equação 5.10 (como a unidade indica, M_E representa a taxa de massa de gotas de metal fundido que alcançam a poça fundida).

$$M_E = \frac{\rho \cdot \pi \cdot d^3 \cdot V_{cheg} \cdot f}{6 \cdot V_{sold}} \quad [Kg.s^{-1}] \quad (\text{Equação 5.10})$$

Os autores mostraram, para o processo MIG/MAG convencional, que a quantidade de movimento efetiva tem uma relação direta com a formação do cordão de solda, conforme Figura 5.8. Também observaram uma mudança de comportamento nos resultados, que foi associada à mudança nos modos de transferência metálica (globular para goticular), ou seja, uma maior corrente não necessariamente implica em maior quantidade de movimento efetivo das gotas.

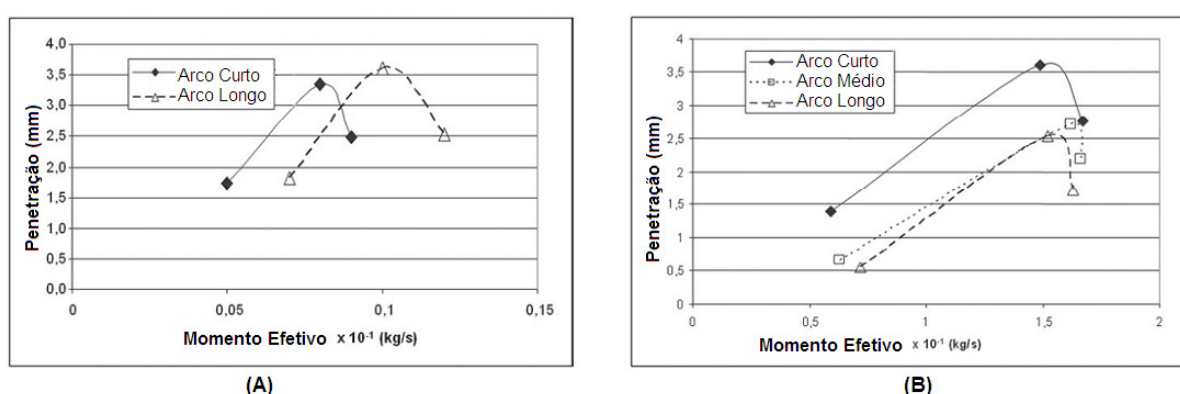


Figura 5.8 – Influência da quantidade de movimento efetiva sobre a penetração do cordão de solda: (A) soldagem de alumínio (SCOTTI; RODRIGUES, 2009b); e (B) soldagem de aço ao carbono (SCOTTI; RODRIGUES, 2009a)

Essers e Walter (1981), por meio de filmagens de alta velocidade determinaram a massa, frequência e velocidade final das gotas em transferência para o processo "Plasma-

MIG" com Arcos Concêntricos. Os autores usaram uma corrente no arco externo de 150 A e uma extensão de 40 mm do eletrodo consumível, realizando soldagens nas polaridades positiva e negativa. Os resultados estão mostrados na Figura 5.9.

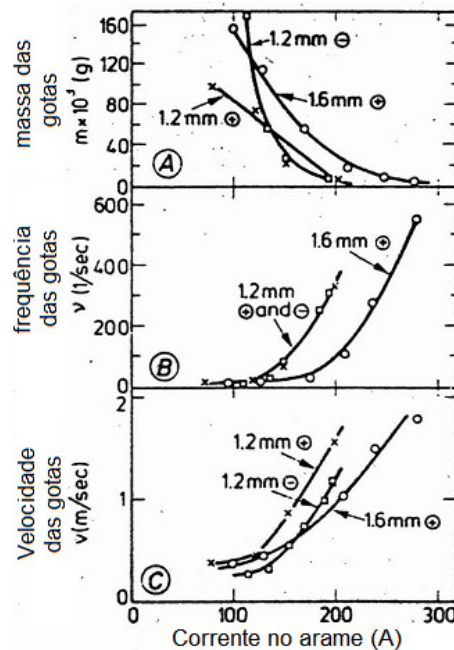


Figura 5.9 – Massa (A); frequência (B); e velocidade das gotas (C) em função da corrente no arame, polaridade e diâmetro do eletrodo, para a condição de 150 A de corrente no arco externo (ESSERS; WALTER, 1981)

A partir dos resultados apresentados na Figura 5.9, Essers e Walters (1981) calcularam o produto da quantidade de movimento (M_{gota}) pela frequência (f) das gotas (taxa de quantidade de movimento - M_{rate}) e a relacionaram com a penetração do cordão de solda no metal de base, como mostrado na Figura 5.10.

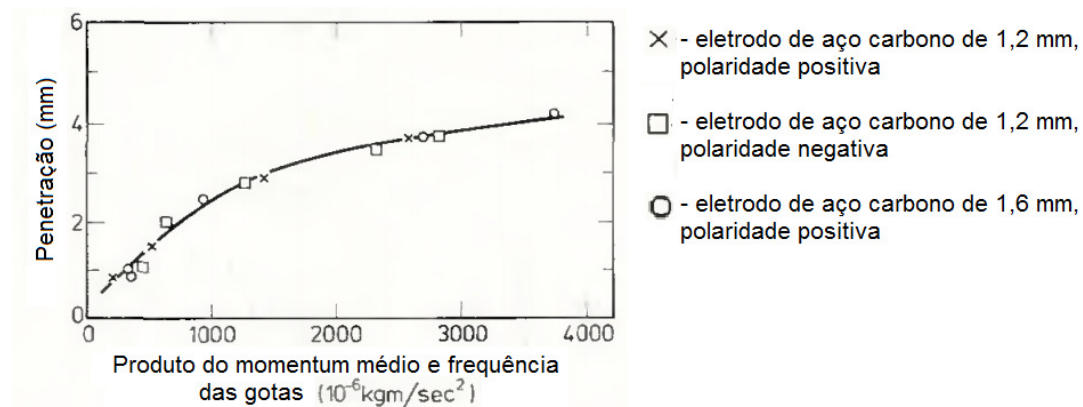


Figura 5.10 – Penetração do cordão de solda no metal de base em função da taxa de quantidade de movimento (ESSERS; WALTER, 1981)

No processo de soldagem "Plasma-MIG" com Arcos Concêntricos, era esperado que a presença do arco externo alterasse as condições da transferência metálica. Essers et al. (1972) observaram que o arco externo atua no sentido de reduzir a corrente de transição goticular-rotacional. Yan et al. (2010), investigando os modos de transferência metálica na soldagem de alumínio, observaram que a presença do arco externo reduz a frequência de transferência quando comparado com a soldagem MIG/MAG convencional. Kim et al. (2012), também soldando com arame de alumínio, observaram que, para uma mesma velocidade de alimentação, a presença do arco externo produziu gotas de diâmetro maior. No entanto, nada foi encontrado sobre a transição globular-goticular para o aço carbono. Desta forma, este capítulo tem o objetivo de descrever a verificação, através de um conjunto de experimentos, de como a presença do arco externo influencia os valores de transição entre a transferência do tipo globular para goticular, a taxa de fusão do eletrodo consumível e também os aspectos cinemáticos das gotas em transferência.

5.2 Procedimentos Experimentais

Para avaliar a influência do arco externo na faixa de transição globular-goticular, foram realizadas soldagens de simples deposição sobre chapa (*"bead-on-plate"*), utilizando duas fontes de soldagem multiprocessos reguladas para operar em polaridade positiva (CC+) e com característica estática corrente constante. Para a corrente no arco externo, foram usados seis valores (0, 35, 55, 75, 95 e 115 A). Para cada condição de corrente no arco externo, a corrente no arco interno (MIG/MAG) foi variada em intervalos de 10 A, de forma que foram obtidas transferências tipicamente globulares (gotas maiores que o diâmetro do eletrodo) e tipicamente goticulares (gotas menores que o diâmetro do eletrodo).

Para cada combinação de corrente, a velocidade de alimentação do arame foi ajustada de modo a manter o comprimento do arco em torno de 5 mm. Paralelamente, a velocidade de soldagem também era ajustada para manter uma relação *Velocidade de Soldagem/Velocidade de Alimentação* constante, o que produz cordões de solda com o mesmo volume e evita variações no comprimento energizado do eletrodo consumível (se a poça de fusão ficar demasiadamente volumosa, o comprimento energizado do eletrodo tende a diminuir para um mesmo comprimento de arco). As condições dos testes realizados estão apresentadas na Tabela 5.2.

A tocha comercial utilizada apresentava um recuo do eletrodo do arco externo (RP) e recuo do bico de contato MIG/MAG (RM), respectivamente igual a 9 e 18 mm. Já para o valor da distância da tocha até a peça (DTP), foi utilizado 10 mm, resultando em uma distância do bico de contato MIG/MAG à peça (DBCP) de 28 mm. O arame-eletrodo usado foi de aço ao carbono da classe AWS ER70S-6, com 1,2 mm de diâmetro, aplicando-se Ar como gás interno a 5 l/min, Ar como gás intermediário a 8 l/min e Ar+8%CO₂ como gás externo a 10 l/min.

Tabela 5.2 – Condições de soldagem utilizadas na determinação da faixa de corrente de transição globular-goticular e taxa de fusão do eletrodo consumível

Ensaio	Corrente no arco Externo [A]	Corrente no arco interno [A]	Velocidade de Alimentação [m/min]	Velocidade de Soldagem [cm/min]
1	0	180	4,7	16
2	0	200	5,7	20
3	0	220	6,5	23
4	0	230	6,9	24
5	0	240	7,2	25
6	35	220	7,4	26
7	35	230	8	28
8	35	240	8,6	30
9	35	250	9	32
10	55	230	8,6	30
11	55	240	8,9	31
12	55	250	9,3	33
13	75	230	9,1	32
14	75	240	9,5	33
15	75	250	9,9	35
16	75	260	10	35
17	95	250	10	35
18	95	260	10,2	36
19	95	270	10,3	36
20	115	240	9,9	35
21	115	250	10,1	35
22	115	260	10,3	36
23	115	270	10,4	36

Para visualização da transferência metálica e dos fenômenos correlatos, foi empregada uma câmera digital capaz de filmar a 2000 qps (quadros por segundo) utilizando a técnica de filmagem do arco de soldagem denominada perfilografia. Perfilografia nada mais é do que uma terminologia mais recente (apresentada por Souza et al., 2007) para designar o termo Shadowgrafia, o qual é descrito em detalhes por Vilarinho (2000). Em soldagem, o termo Perfilografia (Shadowgrafia) vem sendo utilizado para se referenciar à formação da sombra projetada de vários elementos (tocha, eletrodo, gotas, cordão e chapa) em um filme fotográfico ou diretamente sobre a lente de uma filmadora (Figura 5.11). O arranjo experimental foi montado de acordo com o esquema da Figura 5.12.

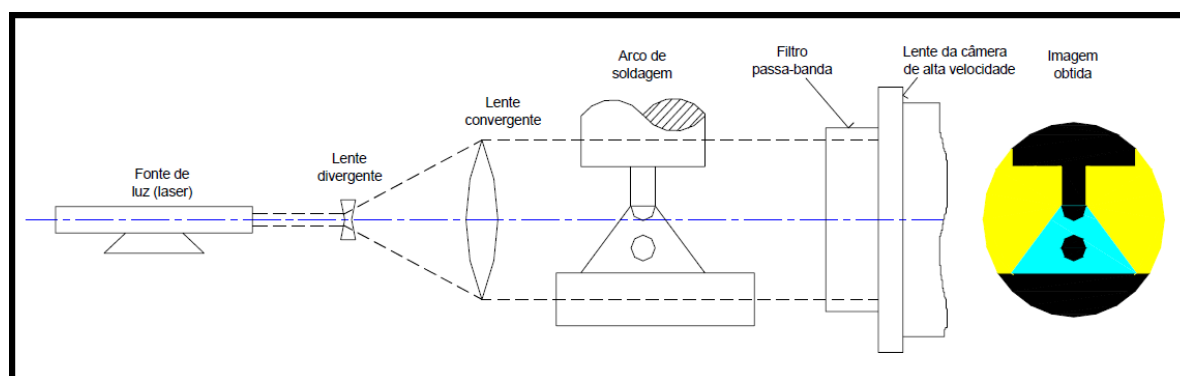


Figura 5.11 - Princípio da Perfilografia aplicada à soldagem (Vilarinho, 2000)

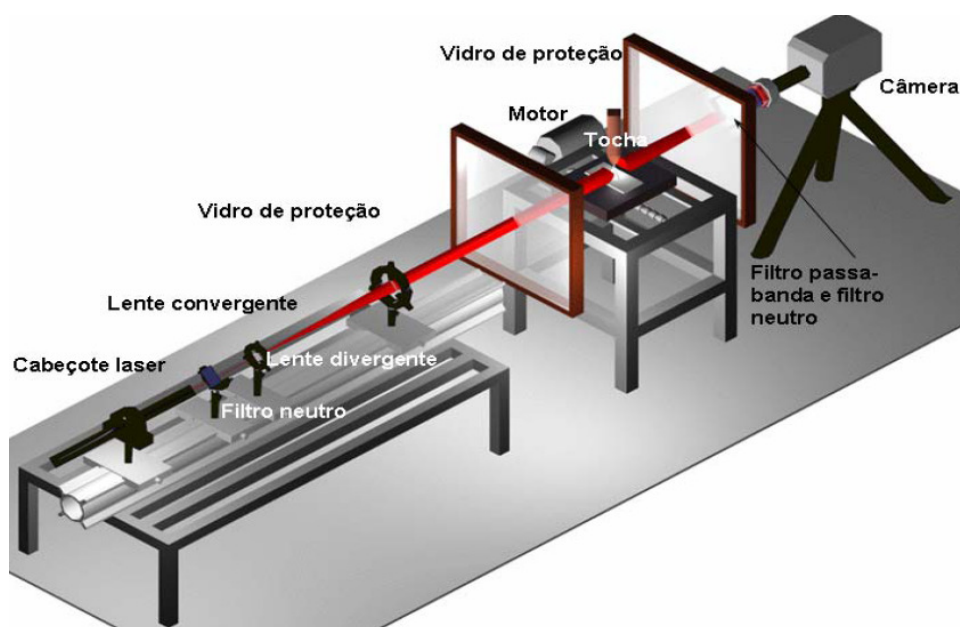


Figura 5.12 - Detalhe do sistema laser-óptico utilizado para filmagem a alta velocidade da transferência metálica (Vilarinho, 2000)

Para a determinação da frequência de destacamento e diâmetro das gotas, foi utilizado o algoritmo proposto por Araujo et al. (2011). A sequência de funcionamento do algoritmo proposto consiste primeiramente na importação de cada imagem salva pela câmera de alta velocidade em formato TIFF (*Tagged Image File Format*). As imagens importadas são similares à mostrada na Figura 5.13(a). Esta figura apresenta uma grande quantidade de ruídos que devem ser removidos para permitir a identificação da gota em transferência. A imagem é, então, convertida para o formato binário (preto e branco), como ilustra a Figura 5.13(b). Porém, esta imagem ainda mantém os ruídos. Com a utilização de funções de dilatação e contração dos pixels, são eliminados parte dos ruídos, como mostra a Figura 5.13(c). Finalmente, são eliminados elementos contendo um número de pixels menor do que o estipulado pelo usuário, conseguindo-se uma imagem isenta de ruídos, como visto na Figura 5.13(d). A partir deste momento, o elemento localizado na parte inferior da imagem é definido como sendo a chapa, o elemento localizado na parte superior é definido como eletrodo mais bocal e os demais elementos são as gotas em transferência (Figura 5.13-e). Com os elementos identificados, é possível determinar suas características como a posição do centroide e a área de cada elemento (Figura 5.13-f).

Este algoritmo localiza o centroide de cada gota e armazena suas coordenadas em uma matriz de posição das gotas, que são posteriormente utilizados no cálculo de aceleração e velocidades de cada gota. Em outra matriz são armazenadas as áreas de cada gota e a partir deste valor é calculado o diâmetro, de acordo com a expressão $d = \sqrt{\frac{4 \cdot A}{\pi}}$.

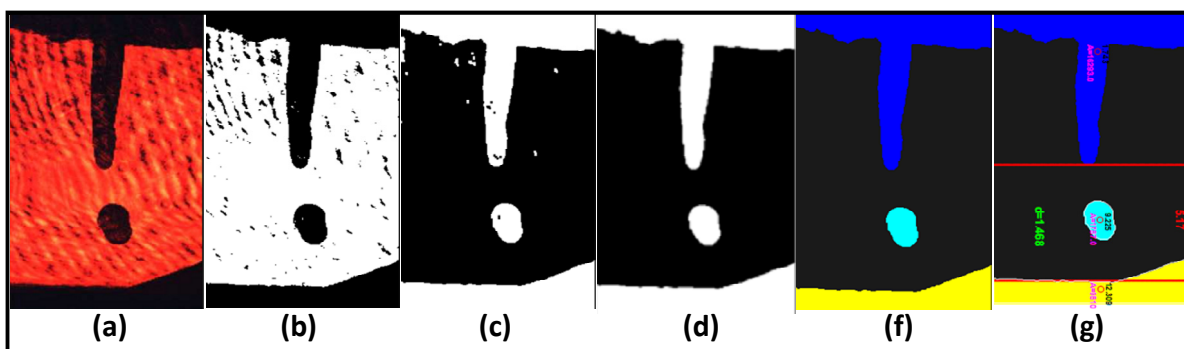


Figura 5.13 – Sequência de tratamento de imagens proposto por Araujo et al. (2011)

O algoritmo proposto por Araujo et al. (2011) se mostrou bastante eficiente na identificação dos elementos presentes na imagem (arame, bocal, chapa e gota) e, principalmente, na identificação das gotas em transferência. Para adequá-lo às necessidades deste trabalho, foram acrescentadas sub-rotinas para identificar o tempo de início e fim da transferência de cada gota, cálculo do diâmetro médio de cada gota,

eliminação de ruídos em imagens com qualidade inferior, cálculo da frequência de destacamento, cálculo das velocidades de saída e chegada e aceleração média das gotas.

5.3 Resultados e Discussões

Na Tabela 5.3 estão apresentados os valores médios para corrente e tensão do arco externo e valores médios e eficazes (RMS) do arco interno para cada um dos experimentos apresentados na Tabela 5.2. Resende et al. (2010), soldando com o processo MIG/MAG convencional com a fonte operando no modo tensão constante, observaram diferenças significativas nos valores médios e eficazes da corrente quando trabalhando no modo de transferência globular e praticamente nenhuma diferença quando no modo goticular. A comparação desses valores foi, então, utilizada pelos autores como um dos critérios para determinar a corrente de transição. Na transferência globular com fontes do tipo tensão constante, acontece uma oscilação periódica da corrente, baseada na contínua redução do arco concomitantemente com o crescimento da gota (que devido ao seu tamanho no modo globular, tem o acoplamento arco-gota sob a mesma), até que haja o destacamento, como o crescimento do arco. Este comportamento da redução progressiva do arco foi ilustrado por Ponomarev et al. (2006). Por definição, quando há oscilação de um sinal, o seu valor eficaz se torna distinto do valor médio do sinal (quanto maior a amplitude de oscilação, maior a diferença). Já no modo goticular, devido à alta frequência de transferência e pequeno tamanho crítico das gotas, a oscilação do arco, assim como a amplitude da oscilação do sinal, são muito pequenas (no oscilograma se confunde com o próprio ruído do chaveamento das fontes).

No presente caso, em que a fonte opera no modo corrente constante, não era de se esperar diferenças entre as correntes médias e eficazes no modo globular, mas sim entre as tensões médias e eficazes. Mas não é o que se pode ver, por exemplo, pela Figura 5.14, que representa uma condição típica de todos os experimentos. Desta forma, os valores da Tabela 5.3, com diferença na ordem de apenas 0,1 V, sugerem que todas as transferências foram no modo goticular. Porém, a Figura 5.15, que apresenta uma sequência de imagens tipicamente globulares, dá evidências de que as transferências dos dados da Tabela 5.3 nem sempre são goticulares.

Tabela 5.3 – Valores médios para corrente e tensão do arco externo e valores médios e eficazes (RMS) para o arco interno

Ensaio	I_{RAE} [A]	I_{RAI} [A]	I_{MAE} [A]	U_{MAE} [V]	I_{MAI} [A]	I_{EAI} [A]	U_{MAI} [V]	U_{EAI} [V]
1	0	180	--	--	181,9	181,9	28,2	28,3
2	0	200	--	--	201,8	201,9	27,0	27,0
3	0	220	--	--	221,7	221,7	27,1	27,2
4	0	230	--	--	231,5	231,5	29,1	29,1
5	0	240	--	--	241,3	241,3	29,7	29,8
6	35	220	37,0	33,3	222,0	222,0	24,4	24,5
7	35	230	36,9	34,3	231,6	231,6	24,9	25,0
8	35	240	36,2	36,2	241,7	241,8	26,2	26,3
9	35	250	36,5	37,8	251,8	251,8	27,0	27,1
10	55	230	54,0	38,7	231,5	231,5	27,4	27,6
11	55	240	54,4	33,4	241,5	241,6	25,6	25,8
12	55	250	53,8	34,9	252,0	252,0	25,9	26,0
13	75	230	75,3	33,6	231,6	231,7	24,0	24,3
14	75	240	75,1	33,1	242,0	242,0	24,2	24,3
15	75	250	75,1	34,9	251,6	251,6	26,2	26,3
16	75	260	74,9	32,7	261,4	261,4	25,8	25,9
17	95	250	94,5	35,3	251,6	251,6	26,1	26,3
18	95	260	94,4	33,8	261,6	261,6	26,2	26,3
19	95	270	94,4	36,8	271,6	271,6	28,1	28,2
20	115	240	113,3	33,9	241,8	241,9	25,2	25,4
21	115	250	112,9	35,1	251,4	251,4	26,4	26,5
22	115	260	113,6	33,4	261,6	261,6	26,1	26,2
23	115	270	113,4	33,7	271,4	271,4	26,8	26,9

Legenda: I_{RAE} - Corrente Regulada para o arco Externo; I_{RAI} - Corrente Regulada para o arco Interno; I_{MAE} - Corrente Média monitorada no arco Externo; U_{MAE} - Tensão Média monitorada no arco Externo; I_{MAI} - Corrente Média monitorada no arco Interno; I_{EAI} - Corrente Eficaz monitorada no arco Interno; U_{MAI} - Tensão Média monitorada no arco Interno; U_{EAI} - Tensão Eficaz monitorada no arco Interno.

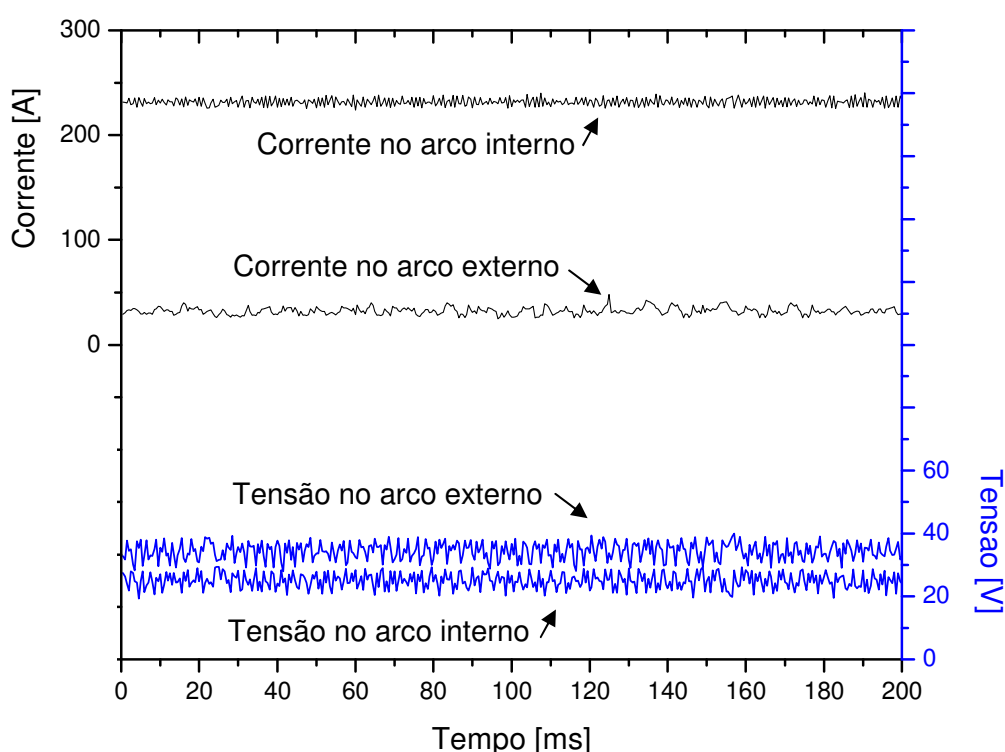


Figura 5.14 – Oscilogramas de corrente e tensão para correntes de referência de 35 A no arco externo e 230 A no arco interno (as oscilações dos sinais, devido à alta frequência, são mais típicas de ruídos externos de medição do que do fenômeno)

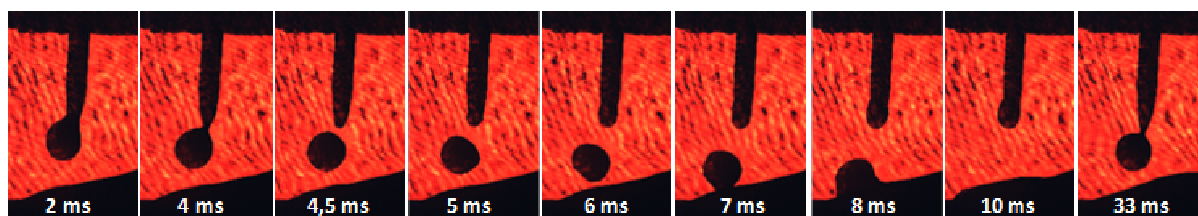


Figura 5.15 – Sequência de imagens para correntes de referência de 35 A no arco externo e 230 A no arco interno

Essa dificuldade de identificação da transferência pelo oscilograma pode ser entendida, uma vez os valores de tensão e correntes são monitorados nos circuitos responsáveis pelo arco interno e externos e não diretamente nos arcos internos e externos. Matthes e Kohler (2002) propõem um modelo elétrico que inclui interações entre os parâmetros elétricos do arco interno e externo. Os autores propõem o modelo indicado na Figura 5.16, no qual circula pelo arco interno uma corrente que varia entre o topo e a base do arco (representado, respectivamente, pelas resistências R_3 e R_4) e similarmente para o arco externo (representado pelas resistências R_7 e R_8). Esta variação ocorre devido à diferença de potencial entre os circuitos Externo e Interno. Como resultado, flui uma corrente

transversal entre os circuitos para equilibrar essa diferença, caracterizada pela resistência R11. Apesar da lógica, este modelo não explica os experimentos com ausência de arco externo. Mesmo assim, este assunto será tratado de forma separada no Capítulo 8.

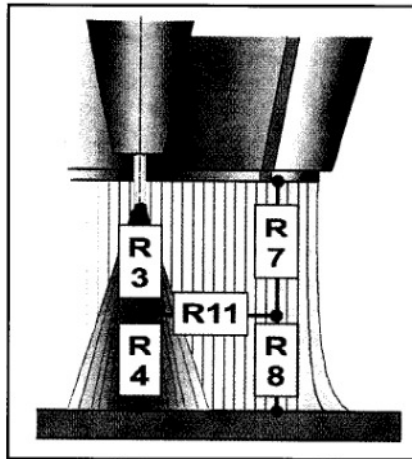


Figura 5.16 – Modelo elétrico para o processo "plasma-MIG" com arcos concêntricos, de acordo com Matthles e Kohler (2002): R3 e R4 = Resistências elétricas no topo e na base do arco interno; R7 e R8 = Resistências elétricas no topo e na base do arco externo; R11 = Resistência elétrica devido a corrente cruzada entre os dois arcos

Uma segunda explicação seria baseada nos dados de Ponomarev et al. (2006), para os quais a resistividade elétrica do plasma resultante de um gás de proteção com 10% de CO₂ em mistura com Argônio é muito similar à da gota em crescimento. No presente caso, o gás de proteção externo continha com 8% de CO₂ em mistura com Argônio, podendo justificar não haver efeito sobre a tensão a variação do comprimento do arco.

Ainda na Tabela 5.3, pode ser observado que o valor da tensão média do arco interno (U_{MAI}) tem uma média de 28 Volts quando não existe corrente no arco externo (processo MIG/MAG convencional). Em contrapartida, esta tensão está em torno de 26 Volts quando corrente é adicionada no arco externo. A queda de tensão de aproximadamente 2 Volts pode estar relacionada ao fato do arco externo exercer a função de um isolante para o arco interno, reduzindo a perda de energia deste para o meio. Resultado semelhante foi encontrado por Rossi (2011), que comparou para o processo TIG a queda de tensão em um meio denominado por ele de "quase-adiabático" (isolamento através de tijolo refratário) e também observou uma queda de tensão em uma operação com "Plasma-MIG" com arcos concêntricos quando comparado ao arco TIG sem isolamento. Rossi atribuiu a queda de tensão à menor taxa de perda de energia do arco na forma de calor, o que leva à menor desionização do plasma e, conseqüentemente, à menor tensão de arco.

Na Figura 5.17 são mostrados os oscilogramas de corrente e tensão para correntes de referência de 35 A no arco externo e 250 A no arco interno correspondente a sequência de imagens mostradas na Figura 5.18. Esta transferência é do tipo intercambiável entre os modos goticular com alongamento e globular, conforme descrição de Scotti et al. (2012), já apresentada no início do capítulo. Como os oscilogramas de transferência globular e goticular não apresentam particularidades que possam ajudar no processo de identificação da corrente de transição, os demais oscilogramas não serão mostrados (apresentam as mesmas características).

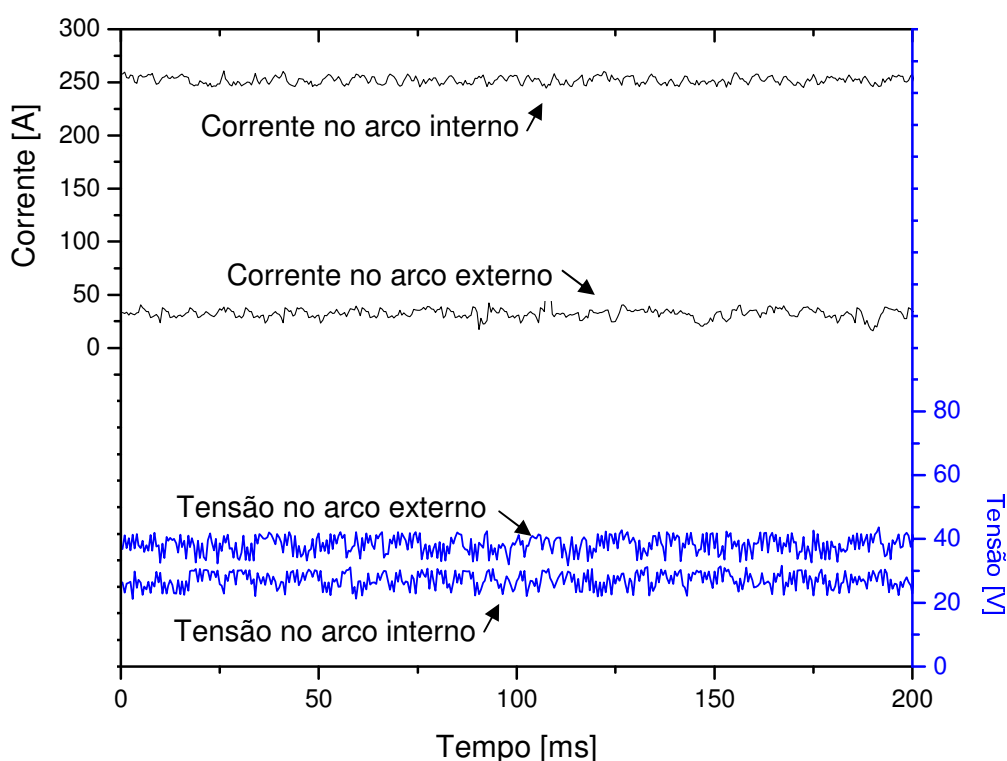


Figura 5.17 - Oscilogramas de corrente e tensão para correntes de referência de 35 A no arco externo e 250 A no arco interno (as oscilações dos sinais, devido à alta frequência, são mais típicas de ruídos externos de medição do que do fenômeno)

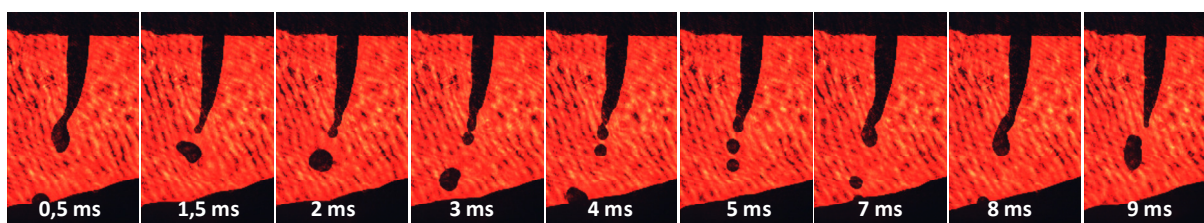


Figura 5.18 – Sequência de imagens para correntes de referência de 35 A no arco externo e 250 A no arco interno

5.3.1 Avaliação do diâmetro e frequência das gotas transferidas em função da corrente no arco externo

Utilizando o algoritmo proposto por Araujo et al. (2011), foram realizadas as medições das frequências de destacamento e diâmetro da gota para as filmagens de cada teste. Na Figura 5.19 é mostrada a variação do diâmetro da gota e da frequência de destacamento em função da corrente no eletrodo consumível na ausência de arco externo (MIG/MAG convencional). Nesta figura, é possível observar que em uma determinada faixa de corrente passando pelo eletrodo consumível acontece uma variação muito grande na frequência de destacamento da gota. Considerando uma variação do diâmetro da gota na faixa de 1,1 e 1,3 mm como parâmetro para caracterizar a transição globular-goticular, pode ser observada uma faixa de transição compreendida entre os valores de 225 e 235 A. Resende et al. (2010) soldando com arame eletrodo de aço carbono de 1,2 mm, DBCP de 18 mm e comprimento de arco de 5 mm observaram uma corrente de transição globular-goticular de 245 A para uma mistura gasosa de Ar+2% CO₂ e 270 A para Ar+8% CO₂. A diferença nos valores pode ser atribuída à diferença na DBCP, que quanto maior, maior o aquecimento do eletrodo por efeito joule e, conseqüentemente, uma menor corrente é necessária para fundir o eletrodo.

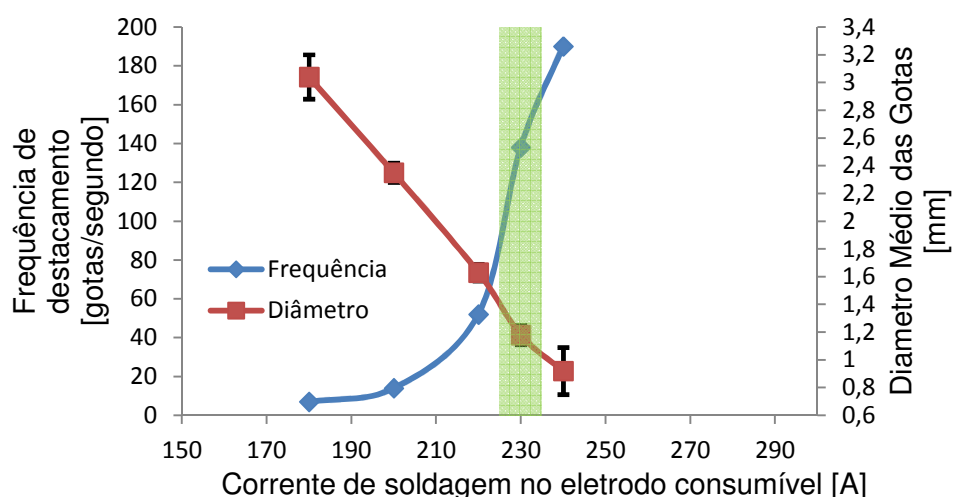


Figura 5.19 – Variação do diâmetro da gota e da frequência de destacamento em função da corrente no eletrodo consumível: DBCP= 28 mm; DTP= 10 mm sem arco externo; arame eletrodo ER 70S-6 de 1,2 mm; Ar como gás interno a 5 l/min; Ar como gás intermediário a 8 l/min e Ar+8%CO₂ como gás externo a 10 l/min

A Figura 5.20 apresenta o efeito da corrente no eletrodo sobre a frequência de destacamento das gotas para diferentes correntes pelo arco externo. Diferente da Figura 5.19, na Figura 5.20 não foi apresentada a variação do diâmetro (que será apresentado na

Figura 5.21) uma vez que deixaria o gráfico “carregado” e de difícil leitura. Nessa figura é possível observar que a presença do arco externo aumenta a corrente necessária no eletrodo consumível para provocar uma mudança significativa na frequência de destacamento das gotas, aumentando a corrente de transição globular-goticular. Para obter uma transferência metálica com a mesma frequência de destacamento, é necessário aumentar a corrente que passa pelo eletrodo consumível quando existe um arco externo. Esta frequência de destacamento tem efeito direto sobre o tamanho da gota, que é o critério utilizado para definir a corrente de transição.

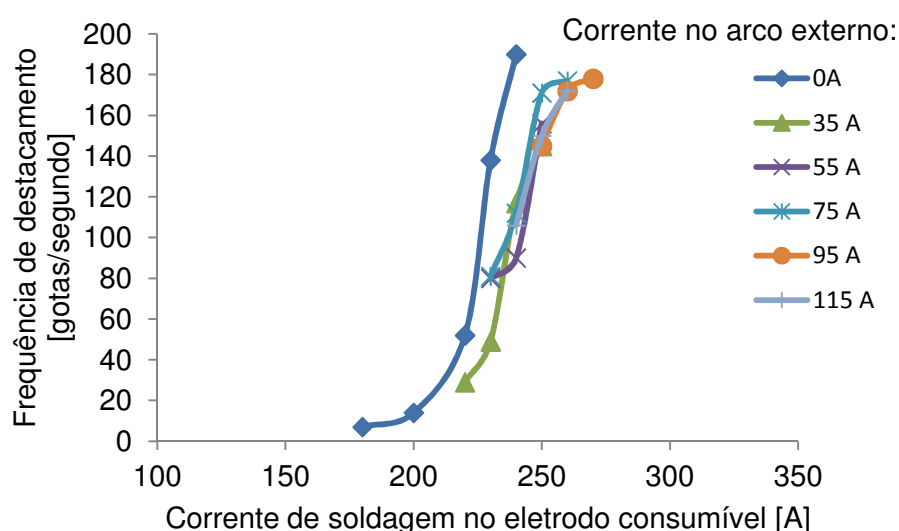


Figura 5.20 – Variação da frequência de destacamento em função da corrente no eletrodo consumível para diferentes correntes pelo arco externo

Na Figura 5.21 é apresentada a variação do diâmetro de destacamento das gotas em função da corrente no eletrodo consumível para diferentes correntes pelo arco externo. Nesta figura, é possível perceber claramente que para uma mesma corrente passando pelo eletrodo consumível (arco interno), as gotas apresentam diâmetros maiores para maiores correntes no arco externo (exceto para 115 A de corrente no arco externo), ou seja, aumentando a corrente no arco externo, aumenta a corrente de transição.

A partir da Figura 5.21, foram obtidos os valores de corrente de transição no arco interno para cada valor de corrente no arco externo, como mostrado na Tabela 5.4. Além da corrente de transição, esta tabela também mostra a corrente total utilizada no processo, que corresponde à somatória da corrente no arco externo mais a corrente no arco interno.

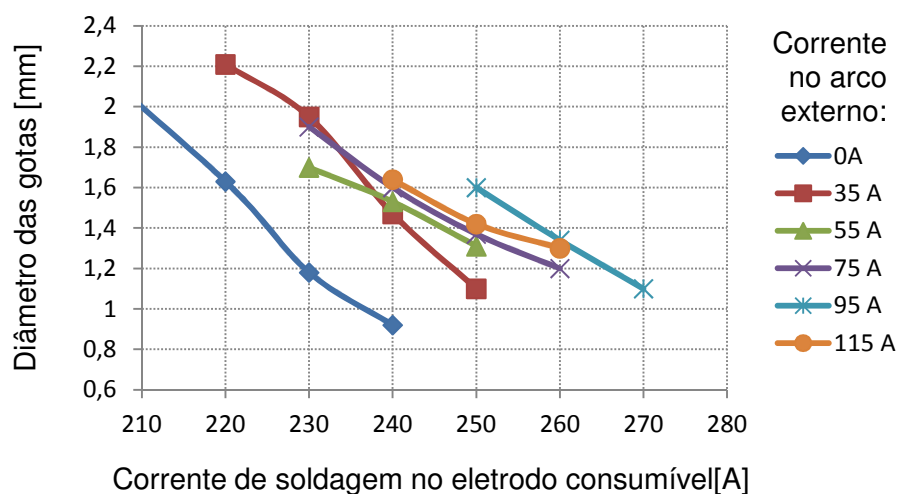


Figura 5.21 - Variação do diâmetro das gotas em função da corrente no eletrodo consumível para diferentes correntes pelo arco externo

Tabela 5.4 – Corrente de transição globular-goticular em função da corrente no arco externo e corrente total no processo

Corrente no arco externo [A]	Corrente de transição (Arco Interno) [A]	Corrente total (Arco Interno mais Arco Externo) [A]
0	229	229
35	247	282
55	251	306
75	257	332
95	265	360
115	262	377

Na Figura 5.22, os resultados estão reapresentados resumidamente na forma de um mapa de transferência da região de transição globular-goticular. Neste gráfico é possível visualizar a variação no diâmetro das gotas em função das correntes envolvidas no processo. A linha pontilhada mostra a evolução da corrente de transição em função da corrente no arco externo.

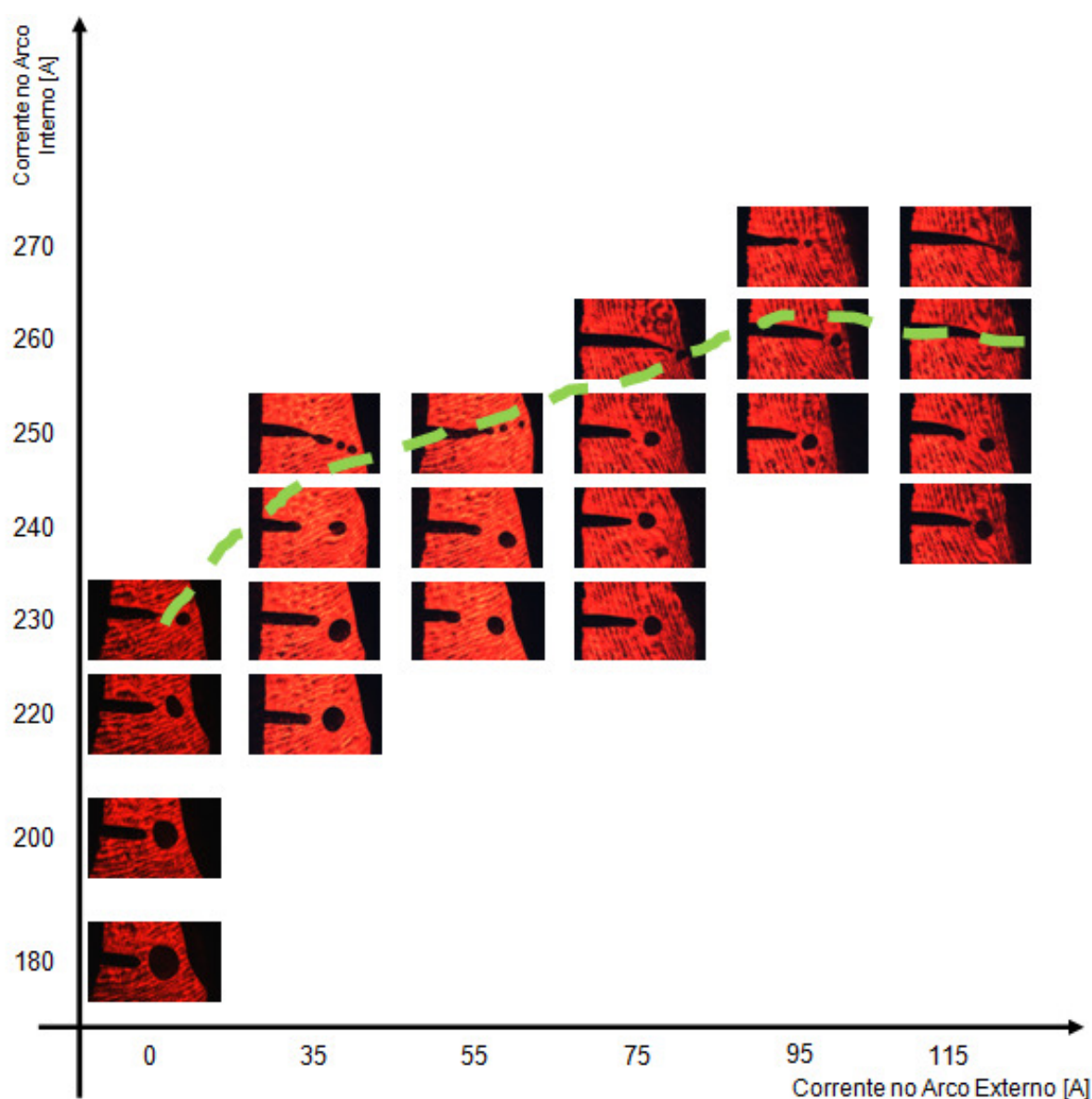


Figura 5.22 – Variação do tipo de transferência metálica em função das correntes pelo arco externo e interno (destaque em pontilhado para a transição globular-goticular)

Os resultados até aqui apresentados podem estar desapontando o leitor, que esperaria que a presença de um arco externo contribísse no sentido de diminuir a corrente de transição. Como o diâmetro da gota aumentou com a presença do arco externo, deve existir uma modificação em uma ou mais forças, de tal forma que a resultante das mesmas aumente em direção vertical ascendente, o que mantém esta gota em contato com o arame por mais tempo. Tanto deve ser verdade que a velocidade de saída das gotas diminui, para uma mesma corrente no arco interno, com a presença do arco externo, conforme mostrado na Figura 5.23.

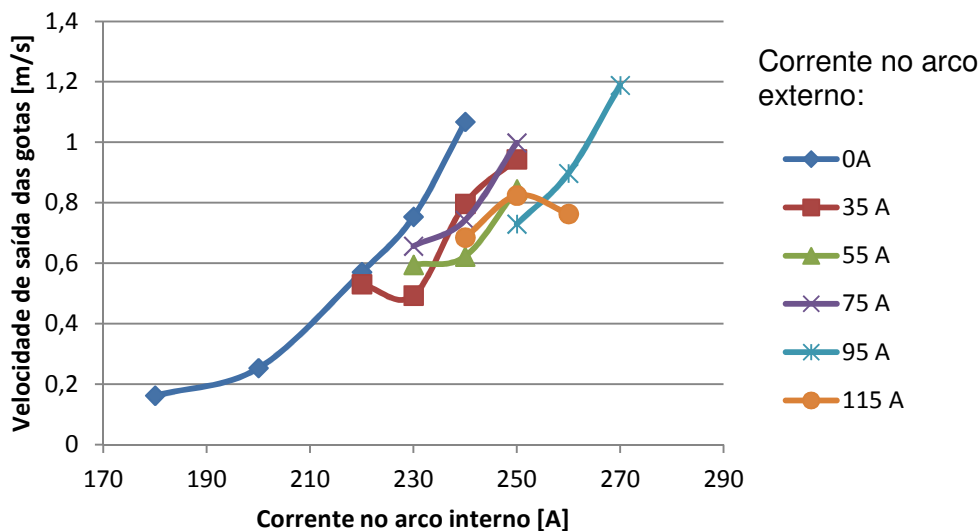


Figura 5.23 – Velocidade de saída das gotas em função da corrente no arco interno para diferentes correntes no arco externo

A justificativa mais plausível para o aumento do diâmetro da gota, quando se acrescenta corrente no arco externo para uma mesma corrente no arco interno, pode estar na modificação da força eletromagnética. Wang et al. (2003), por meio de simulação, determinaram para o processo MIG/MAG convencional parâmetros como velocidade de movimentação da gota, densidade de corrente, campo magnético e força eletromagnética, para a gota em processo de formação (Figura 5.24) e instantes antes do destacamento (Figura 5.25).

Pela Figura 5.24, pode ser observado que a densidade de corrente diminui à medida que aproxima da extremidade inferior da gota, uma vez que a corrente é escoada pelo jato de plasma que se forma um pouco acima da extremidade inferior da gota. Este gradiente de corrente provoca variações no campo magnético, que por sua vez, resulta em diferenças na força eletromagnética ao longo da gota em formação. Esta força eletromagnética em conjunto com a força de arraste e a força devido à ação da gravidade atuam no sentido de destacar a gota, que são contrabalanceadas pela força devido à tensão superficial e a força de reação pela vaporização de metal na superfície da gota.

A Figura 5.25 por sua vez, apresenta a gota após a mesma atingir um tamanho crítico e apresentar uma redução de área na região da interface com o arame (similar ao que acontece com uma gota se formando na extremidade de um conta-gotas). Nesta situação, ocorre um aumento na densidade de corrente (devido à redução de área), com aumento do gradiente de campo magnético e, conseqüentemente, da força eletromagnética, contribuindo para o aumento da força no sentido de destacar a gota.

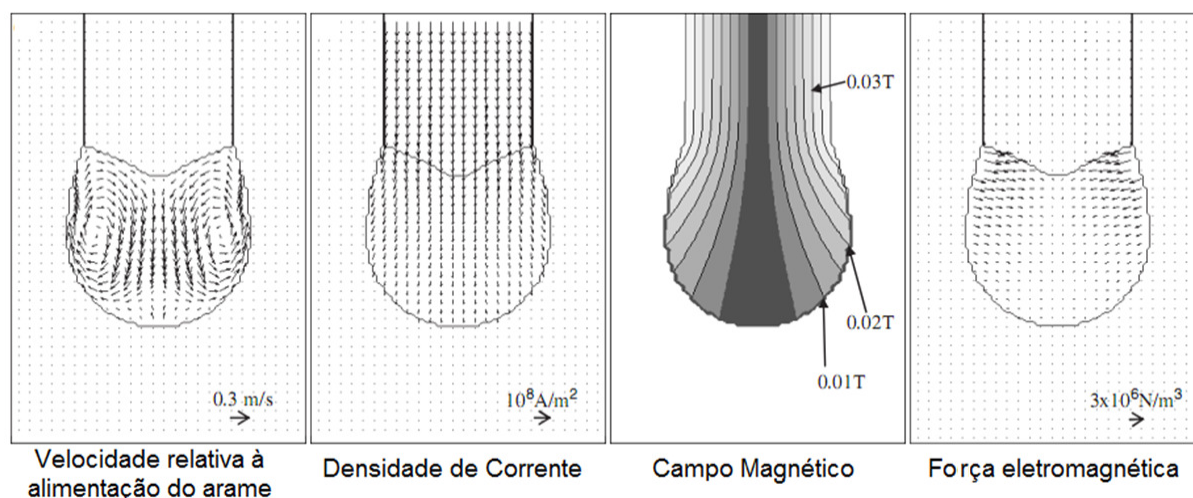


Figura 5.24 - Resultados de simulação da distribuição das variáveis físicas durante o crescimento da gota para a soldagem MIG/MAG com 175 A de corrente (WANG et al., 2003)

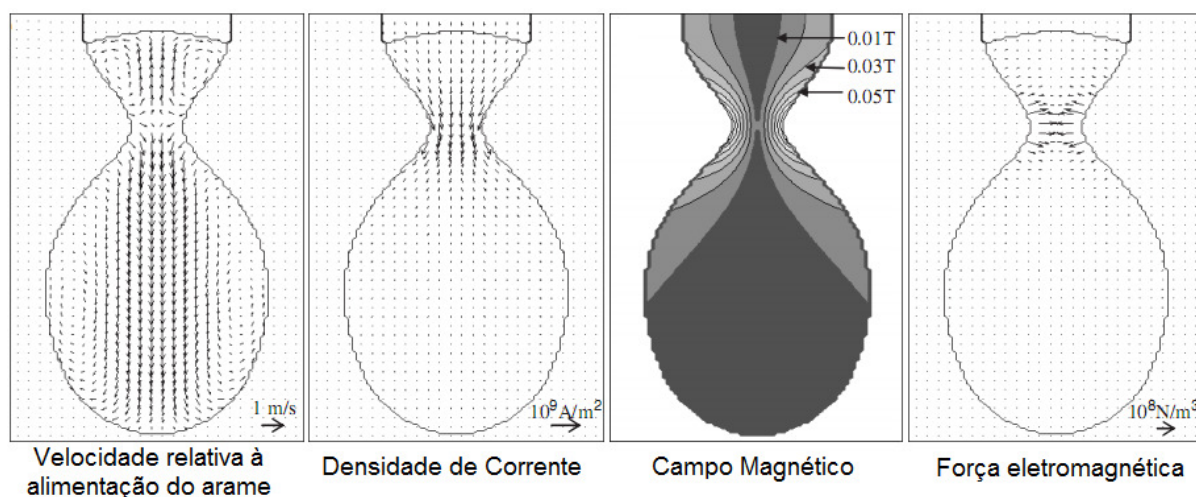


Figura 5.25 - Resultados de simulação da distribuição das variáveis físicas antes do destacamento da gota para a soldagem MIG/MAG com 175 A de corrente (WANG et al., 2003)

Considerando agora o processo "Plasma-MIG" com Arcos Concêntricos, a presença do arco externo deve garantir condições para que parte da corrente do arco interno deixe o arame acima da região de formação da gota, o que reduz a densidade de corrente passando pelo eletrodo, consequentemente reduzindo a força eletromagnética que é decisiva para "estrangulamento" e deslocar a gota no sentido do destacamento (efeito *pinch*).

5.3.2 Variação da velocidade de alimentação do eletrodo consumível em função da corrente nos arcos externo e interno

A Figura 5.26 apresenta a variação da velocidade de alimentação em função da corrente passando pelo arame para diferentes condições de corrente no arco externo. Observa-se uma contribuição significativa do arco externo na fusão do eletrodo, contribuição esta que é mais significativa para uma corrente mínima no arco externo (35 A) e vai diminuindo gradativamente com o aumento da corrente no arco externo. Estes resultados estão de acordo com Oliveira (2006) e Resende (2009), que observaram essa mesma tendência e afirmam que o incremento na taxa de fusão do eletrodo depende da sua capacidade em absorver a energia disponibilizada pelo arco externo ao longo do comprimento livre do arame-eletrodo. Esta absorção depende, por sua vez, dos mecanismos de transferência de calor (condução, convecção e irradiação).

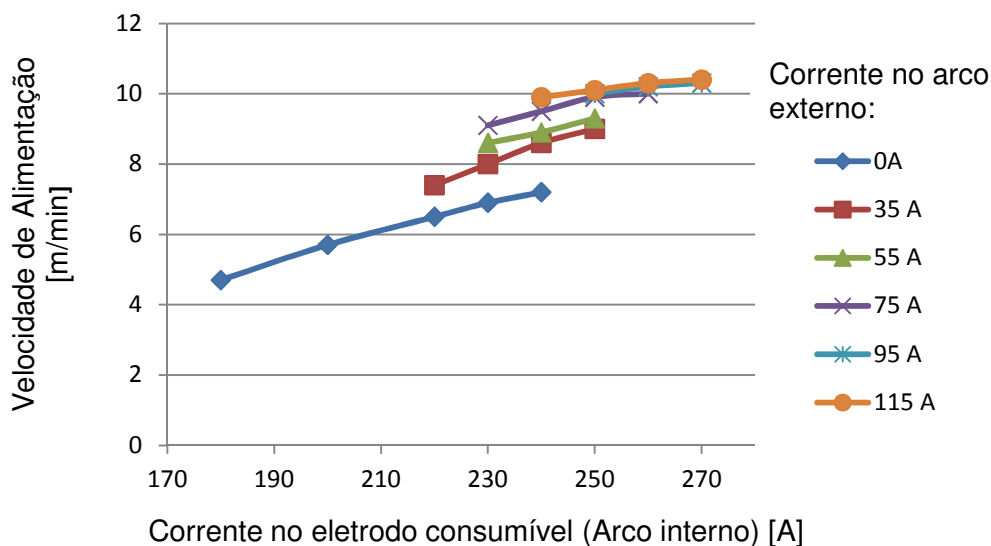


Figura 5.26 - Variação da velocidade de alimentação em função da corrente no eletrodo consumível para diferentes correntes pelo arco externo

5.4 Avaliação Cinemática da Transferência Metálica no Processo "Plasma-MIG" com Arcos Concêntricos

O objetivo desta etapa foi verificar as características cinemáticas das gotas metálicas em transferência no processo "Plasma-MIG" com Arcos Concêntricos, baseadas no cálculo da quantidade de movimento efetivo proposto por Scotti e Rodrigues (2009a). Rodrigues (2007) determinou que 9 (nove) era o número mínimo de amostras, com um nível

de confiança de 95%. Assim, esse autor realizou medidas em 9 gotas de cada experimento, escolhidas aleatoriamente, 3 no começo do filme, 3 no meio e 3 no final.

Neste trabalho, foram analisados dez gotas para cada uma das condições de soldagem, 3 gotas próximas ao início do filme, 3 gotas próximas ao final do filme e 4 gotas no meio do filme. Os filmes correspondentes a cada condição de soldagem eram compostos por 4000 quadros. Para permitir uma visualização do procedimento, foram descontados os tempos entre os intervalos avaliados (entre amostras do início e meio do filme e entre amostras do meio e do fim) e as gotas apresentadas na sequência, conforme Figura 5.27(a). Posteriormente, com o auxílio do Excel®, todas as gotas foram colocadas em um único referencial, ou seja, o primeiro ponto onde a gota era identificada após o destacamento era considerado a referência (tempo e espaço), conforme Figura 5.27(b). Nesta figura também foi acrescentada uma sequência correspondente à média, sobre a qual foi ajustada uma linha de tendência de 2ª ordem, tal qual fizeram Rhee e Kannatey-Asibu (1992) e Scotti e Rodrigues (2009a).

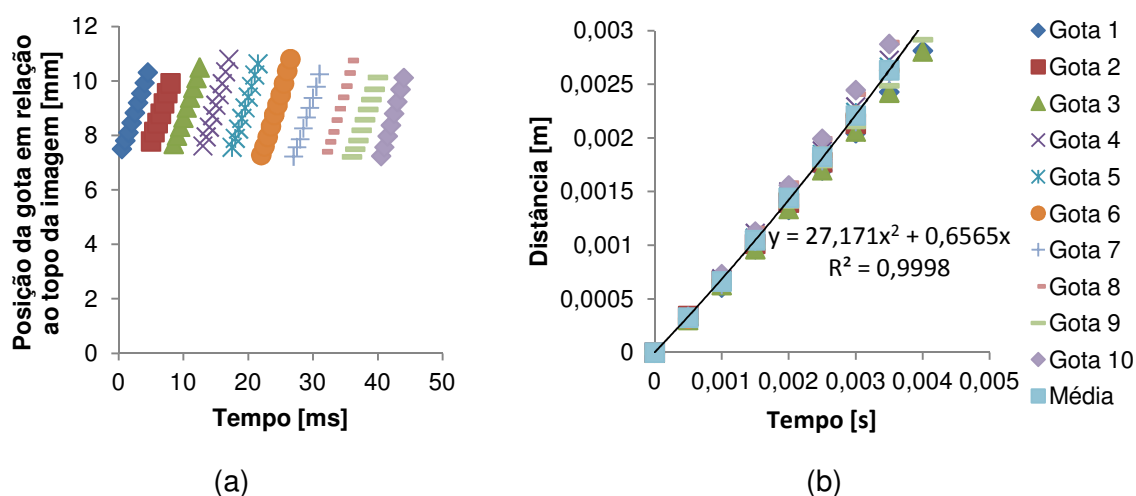


Figura 5.27 – Posição da gota em relação ao topo da imagem em função do tempo (a) e distância percorrida pela gota a partir do destacamento em função do tempo (b) para uma corrente de 230 A no arco interno e de 75 A no arco externo

A Figura 5.27(b) corresponde à soldagem com corrente de 230 A no arco interno e de 80 A no arco externo, todas as demais condições estão no apêndice. As equações de segunda ordem ajustadas para os valores médios de cada experimento, que são do formato da Equação 5.11.

$$y = m \cdot x^2 + n \cdot x$$

(Equação 5.11)

que é correspondente a equação da posição, que descreve o movimento retilíneo uniformemente variado (MRUV) (Equação 5.12).

$$S = S_0 + v_0 \cdot t + \frac{a}{2} \cdot t^2 \quad (\text{Equação 5.12})$$

Considerando as equações 5.11 e 5.12, o termo $S_0 = 0$, uma vez que todas as gotas partem da origem, v_0 corresponde ao termo n e finalmente, $\frac{a}{2}$ corresponde ao termo m . Estes parâmetros por sua vez são mostrados na Tabela 5.5.

Tabela 5.5 – Parâmetros cinemáticos das gotas em transferência

Corrente no Arco Interno [A]	Corrente no Arco Externo [A]	$S = S_0 + v_0 \cdot t + \frac{a}{2} \cdot t^2$		Segunda derivada (aceleração, a) [m/s ²]	$v^2 = v_0^2 + 2 \cdot a \cdot \Delta s$
		Velocidade inicial v_0 [m/s]	Metade da aceleração $\frac{a}{2}$ [m/s ²]		Velocidade em 4 mm [m/s]
240	0	1,067	35,373	70,746	1,306
230	0	0,753	65,125	130,25	1,268
220	0	0,570	26,736	53,472	0,867
200	0	0,253	24,801	49,602	0,678
180	0	0,162	11,507	23,014	0,458
250	35	0,943	25,086	50,172	1,136
240	35	0,796	34,708	69,416	1,090
230	35	0,493	13,123	26,246	0,673
220	35	0,530	12,946	25,892	0,699
250	55	0,844	38,354	76,708	1,152
240	55	0,622	44,663	89,326	1,049
230	55	0,595	17,156	34,312	0,792
250	75	0,998	32,389	64,778	1,230
240	75	0,742	31,029	62,058	1,023
230	75	0,656	27,171	54,342	0,930
270	95	1,188	54,55	109,118	1,511
260	95	0,897	40,103	80,206	1,202
250	95	0,729	36,295	72,59	1,054
260	115	0,763	36,164	72,328	1,077

Corrente no Arco Interno [A]	Corrente no Arco Externo [A]	$S = S_0 + v_0 \cdot t + \frac{a}{2} \cdot t^2$		Segunda derivada (aceleração, a) [m/s ²]	$v^2 = v_0^2 + 2 \cdot a \cdot \Delta s$
		Velocidade inicial v_0 [m/s]	Metade da aceleração $\frac{a}{2}$ [m/s ²]		Velocidade em 4 mm [m/s]
250	115	0,824	47,821	95,642	1,201
240	115	0,685	29,222	58,444	0,967

Rodrigues (2007) estabeleceu como interesse para a avaliação do momento efetivo apenas os valores da velocidade instantânea de chegada e a aceleração média da gota durante a trajetória (coeficiente angular da primeira derivada da equação da curva de ajuste posição versus tempo). No entanto, para este trabalho optou-se por calcular a velocidade da gota para a posição 4 mm, minimizando os efeitos de pequenas variações no comprimento do arco de um experimento para outro (entre os experimentos os comprimentos de arco oscilaram entre 4 e 5,9 mm, apesar dos cuidados para manter este comprimento o mais constante possível). Estes resultados estão apresentados na Tabela 5.5 e de forma gráfica na Figura 5.28. Para determinar a aceleração foi utilizado o mesmo procedimento de Rodrigues (2007).

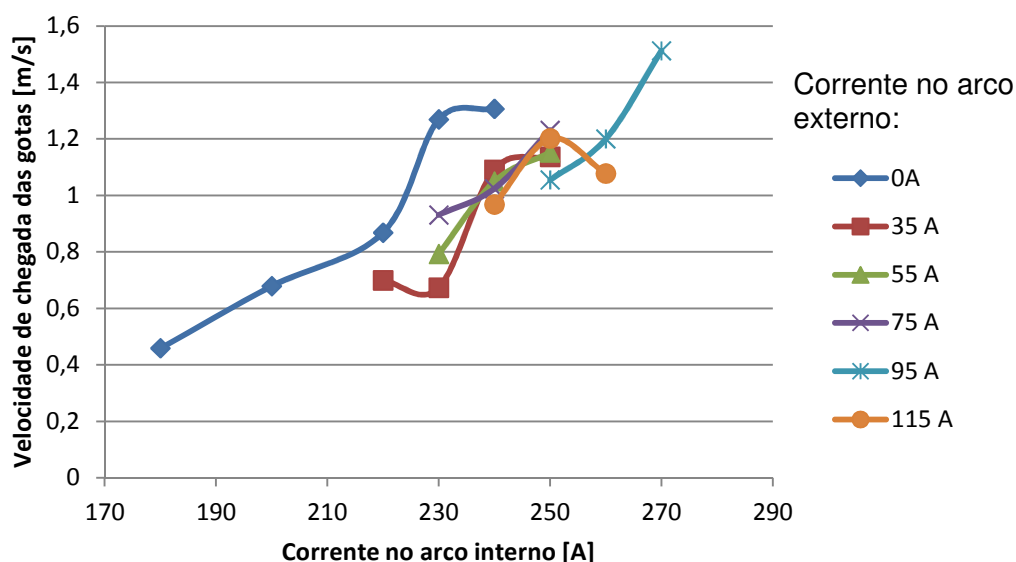


Figura 5.28 – Velocidade de chegada das gotas em função da corrente no arco interno para diferentes correntes no arco externo

A partir da Figura 5.28, pode ser observado que para uma corrente no arco externo de 0 A (processo MIG/MAG), a velocidade de chegada das gotas aumenta com o aumento

da corrente, assim como observado por Jones et al. (1998) (Figura 5.7 (B)). Isto acontece devido ao aumento da força exercida pelo jato de plasma. Outro ponto é a variação de comportamento da curva para os valores mais altos de corrente, que pode estar associado à mudança no modo de transferência metálica, uma vez que o diâmetro das gotas diminui, o que reduz o arraste provocado pelo jato de plasma e, conseqüentemente, menor velocidade das gotas.

Na presença de arco externo, apesar dos pontos estarem situados numa região próxima, para mesmos valores de corrente no arco interno, a velocidade das gotas diminui. Isto pode estar associado a uma menor concentração de energia na presença do arco externo, que diminui em função do aumento de área.

A Figura 5.29 apresenta os valores calculados com base na Equação 5.8 da quantidade de movimento das gotas em função da corrente no arco interno para diferentes valores de corrente no arco externo. De forma geral, estes resultados mostram que para uma mesma corrente no arco interno, quanto maior a corrente no arco externo, maior a quantidade de movimento das gotas. No entanto este incremento na quantidade de movimento das gotas não necessariamente afeta a formação do cordão de solda. Murray e Scotti (1999) observaram que, em relação à penetração do cordão de solda, o parâmetro mais importante é a frequência com que as gotas são transferidas para a poça de fusão. Conforme sugerido pelos autores, na época, o mais representativo é trabalhar com a taxa de quantidade de movimento.

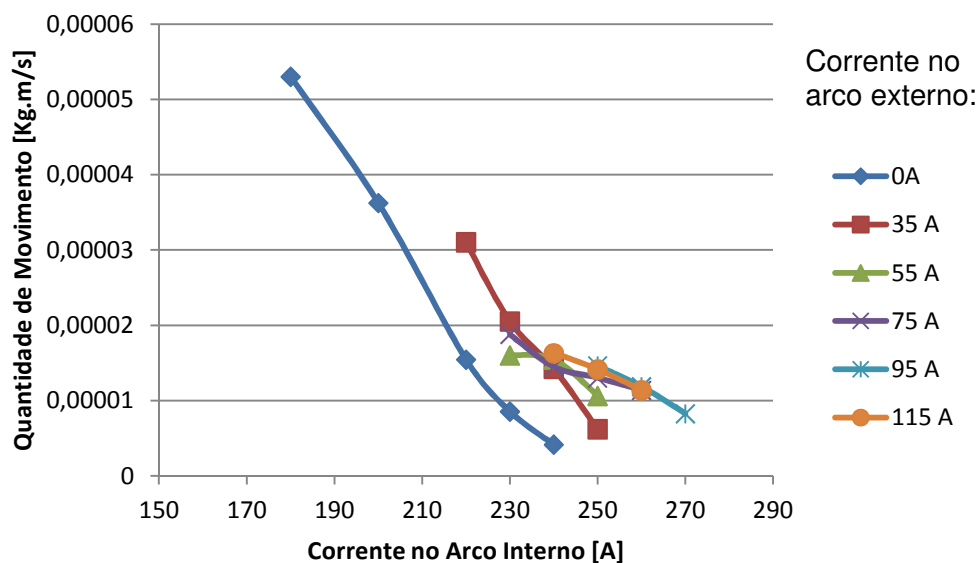


Figura 5.29 – Quantidade de movimento das gotas em função da corrente no arco interno para diferentes valores de corrente no arco externo

A Figura 5.30 mostra a força de impacto das gotas sobre a poça de fusão, que corresponde à taxa de quantidade de movimento (M_{rate}) da equação 5.9. Considerando uma mesma corrente no arco interno, de forma geral, o aumento na corrente no arco externo aumenta a taxa de quantidade de movimento. No entanto, este parâmetro não leva em conta a velocidade de soldagem e, como o presente trabalho é realizado em diferentes condições de velocidade de soldagem, o parâmetro que parece mais coerente é a quantidade de movimento efetiva.

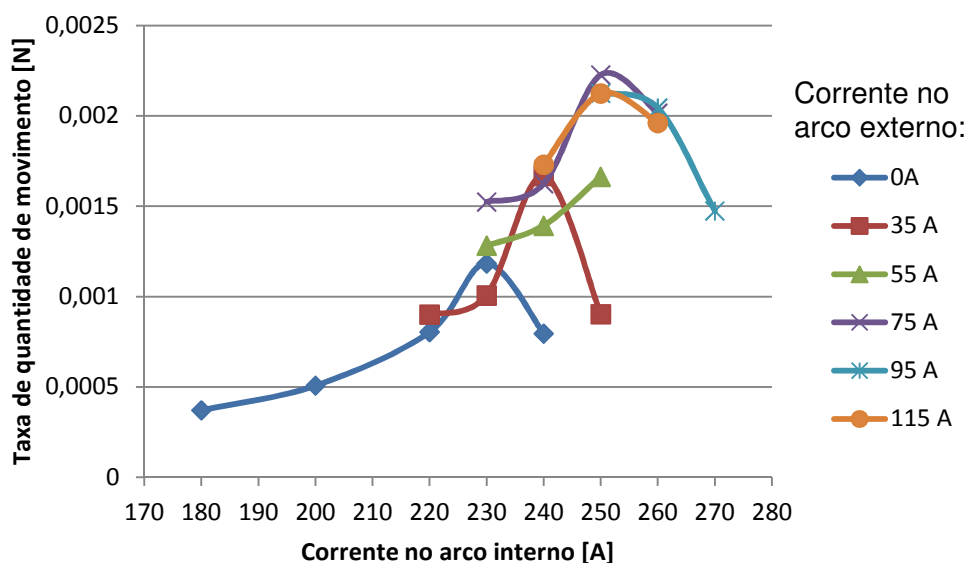


Figura 5.30 – Taxa de quantidade de movimento atuante na poça devido o impacto das gotas em função da corrente no arco interno para diferentes valores de corrente no arco externo

Na Figura 5.31 são apresentados os resultados para o cálculo da quantidade de movimento efetivo, de acordo com a equação 5.10. Tanto para o processo MIG/MAG convencional (corrente no arco externo de 0 A) quanto para o "Plasma-MIG" com Arcos Concêntricos, as curvas de movimento efetivo apresentam o mesmo comportamento, ou seja, inicialmente aumentam com o aumento do arco interno e depois diminuem, caracterizando um ponto de máximo nas curvas. Este comportamento pode ser atribuído à mudança no modo de transferência metálica, uma vez que os valores para corrente de transição apresentados na Tabela 5.4 coincidem com a região de inflexão das curvas mostradas na Figura 5.31. Na primeira parte, o aumento do momento efetivo está relacionado ao aumento da velocidade em função da corrente no arco interno (Figura 5.28), sabendo que o momento efetivo é proporcional a velocidade de chegada. Na segunda parte, a redução no momento efetivo ser entendido com o auxílio da equação 5.10, que mostra sua

dependência com o cubo do diâmetro (d^3) e com a frequência (f). Mesmo com o aumento da frequência, que tende a aumentar o momento efetivo, o efeito da redução do diâmetro se sobrepõe, uma vez que o mesmo contribui ao cubo.

Esta tendência está de acordo com a observada por Scotti e Rodrigues (2009). Soldando com o processo MIG/MAG convencional, os autores obtiveram os valores de 0,059, 0,167, e 0,149 Kg/s para a quantidade de movimento efetivo, respectivamente para 200, 250 e 300 A de corrente. Scotti e Rodrigues (2009) associaram esta variação (aumento e posterior decréscimo na quantidade de movimento efetivo) à mudança nos modos de transferência metálica. Comparar os valores obtidos pelos autores com os do presente trabalho não é viável, uma vez que o movimento efetivo depende não só da massa e frequência das gotas, mas também da combinação destes parâmetros com o comprimento do arco, a corrente e velocidade de soldagem. Mas os resultados estão na mesma ordem de grandeza (centésimo de Kg/s), o que confere um grau de confiança nos resultados.

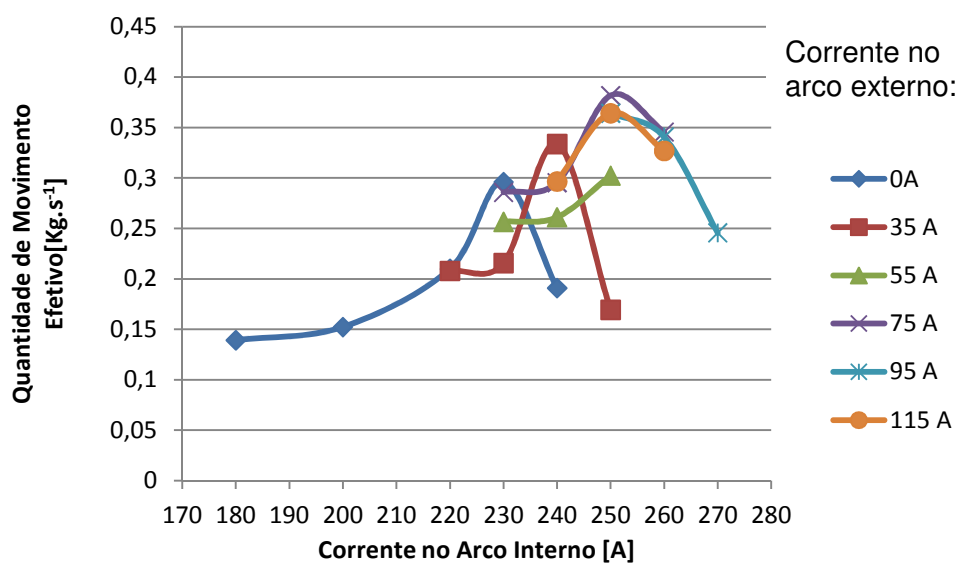


Figura 5.31 - Quantidade de movimento efetivo das gotas em função da corrente no arco interno para diferentes valores de corrente no arco externo

5.5 Considerações do Capítulo

Para as condições e parâmetros de soldagem utilizados neste trabalho, pode-se concluir que:

- A presença do arco externo aumenta o valor da corrente de transição globular-goticular;

- A presença do arco externo contribui no sentido de aumentar a taxa de fusão do eletrodo consumível;
- Com o arco externo, o diâmetro das gotas de metal transferidas são maiores, para uma mesma corrente de soldagem passando pelo eletrodo consumível;
- O aumento da corrente no arco interno tende a aumentar a velocidade de chegada das gotas na poça de fusão;
- A quantidade de movimento efetiva aumenta com a corrente quando está associada ao modo de transferência globular e diminui quando associada ao modo de transferência goticular (os pontos máximos para a quantidade de movimento estão relacionados à mudança no modo de transferência metálica).

CAPÍTULO VI

INFLUÊNCIA DAS CORRENTES NO ARCO EXTERNO E NO ELETRODO CONSUMÍVEL, ÂNGULO DE INCLINAÇÃO DA TOCHA E DISTÂNCIA ENTRE A TOCHA E A PEÇA SOBRE A GEOMETRIA DO CORDÃO DE SOLDA

6.1 Introdução

Como atrativo, o Processo MIG/MAG oferece uma alta taxa de deposição e a possibilidade de adição de material com diferentes composições químicas. Entretanto, no processo MIG/MAG a penetração é relativamente pequena, exigindo normalmente a confecção de chanfros. Este problema é superado pela adição de material. Porém, como nos outros processos com eletrodos consumíveis, a corrente de soldagem está estreitamente interligada com a taxa de alimentação de metal de adição, para uma dada condição de soldagem (gás de proteção, comprimento e tipo de eletrodo, etc.).

Este fato traduz a forte dependência existente entre os aportes de energia e de material nesses processos, ou seja, há pouca margem para se aumentar a corrente sem também alterar a quantidade de material a ser depositado. Como a geometria de um cordão de solda depende da energia imposta e também da quantidade de material depositado por unidade de comprimento da solda, uma das principais consequências desta dependência é a dificuldade em se controlar livremente a geometria do cordão de solda.

Essers (1976), soldando com um modelo de tocha mostrado na Figura 2.2, verificou que incrementos de 300 A de corrente no arco externo aumentava em apenas 1 mm a penetração do cordão de solda (Figura 6.1(a)), mas, por outro lado, o efeito sobre a largura do cordão foi bastante pronunciado (Figura 6.1(b)).

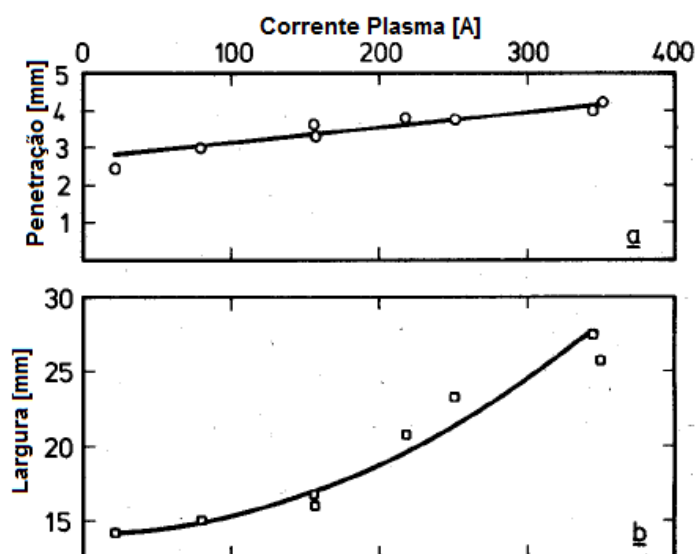


Figura 6.1 – Penetração (a) e largura (b) do cordão em função da corrente no arco externo; arame eletrodo de aço carbono de 1,2 mm, 215 A de corrente no arco interno, comprimento livre do eletrodo de 40 mm e velocidade de soldagem de 0,35 m/min (ESSERS, 1976)

Oliveira (2006), soldando com o mesmo modelo de tocha utilizado neste trabalho, avaliou a largura do cordão em função da corrente Plasma (corrente no arco externo). No entanto, o autor variou a corrente média MIG/MAG Pulsada para cada ensaio para que a taxa de fusão do arame permanecesse constante (os valores de corrente MIG/MAG não estão informados). Os resultados estão mostrados na Figura 6.2.

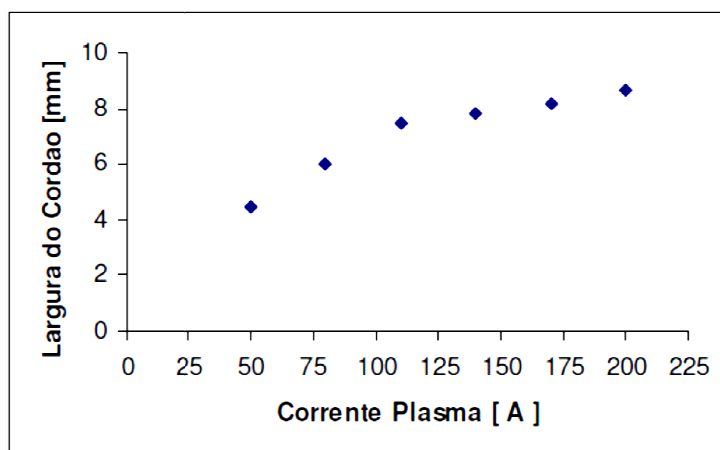


Figura 6.2 - Largura do Cordão em função da corrente no arco externo (Plasma) no processo "Plasma-MIG" com Arcos Concêntricos em atmosfera de Ar + 4% CO₂: Arame-eletrodo de aço, 1,2 mm de diâmetro; Velocidade do arame: 4 m/min; Velocidade de soldagem: 50 cm/min; Material de base: Aço carbono, 3 mm de espessura (OLIVEIRA, 2006)

Ono et al. (2009), utilizando um modelo de tocha similar a utilizada neste trabalho, também pulsando a corrente no arco interno e variando seu valor médio para manter constante a velocidade de alimentação do arame, observaram durante a soldagem de juntas sobrepostas que o aumento da corrente no arco externo aumenta a largura e diminui a penetração do cordão (Figura 6.3).

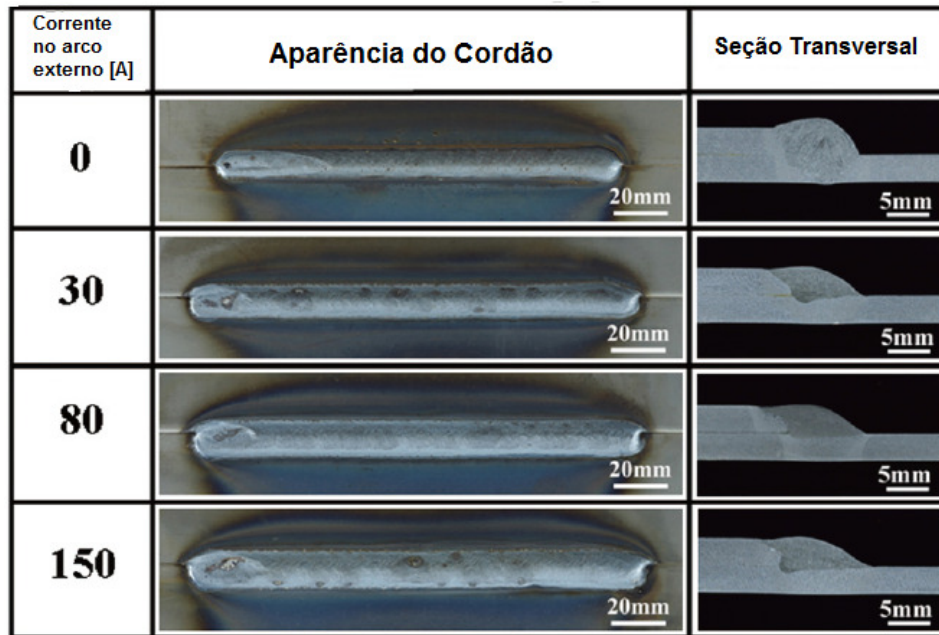


Figura 6.3 – Efeito da corrente no arco externo sobre a aparência e na seção transversal do cordão de solda: Velocidade de alimentação do arame de 10 m/min e velocidade de soldagem de 80 cm/min (ONO et al., 2009)

Essers e Walter (1981), usando um calorímetro de água, mediram o calor imposto à peça em função da corrente total fornecida ao processo, como mostrado na Figura 6.4, onde existe uma notável diferença entre o calor imposto no processo MIG/MAG convencional e no "Plasma-MIG" com Arcos Concêntricos. Os autores atribuíram o fato a existência, nos dois casos, de apenas um cátodo, a peça. Na soldagem MIG/MAG existe apenas um anodo, o arame. Por outro lado, na soldagem "Plasma-MIG" com Arcos Concêntricos, existem dois anodos, o arame e o eletrodo não consumível. No último caso, parte do calor é removido pelo sistema de refrigeração do eletrodo não consumível.

Comparando as curvas a, b e d na Figura 6.4, Essers e Walter (1981) tiraram algumas conclusões sobre o processo MIG/MAG. Embora as proporções entre as quantidades de energia transferida para a peça não sejam exatamente iguais em toda a gama de correntes, a quantidade de calor transferida para a peça por convecção, radiação e condução estão em torno de 34% (+/- 3%) da entrada total de calor, no caso da soldagem

MIG/MAG. A passagem da corrente através da conexão catódica entrega aproximadamente 41% (+/- 3%). Finalmente, as gotas metálicas contribuem em torno de 25% (+/- 5%) do total de calor transferido à peça.

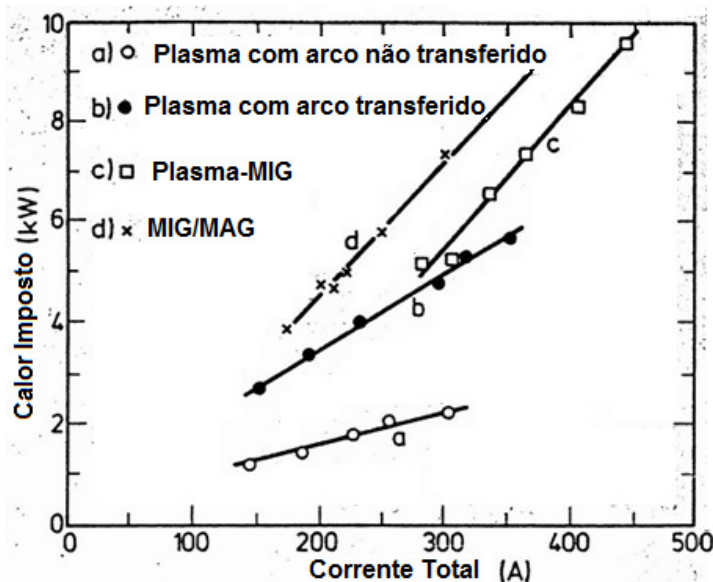


Figura 6.4 - Calor imposto a peça (medido) em função da corrente total fornecida ao processo (ESSER; WATER, 1981)

As referências que fazem alguma avaliação do perfil do cordão de solda foram feitas sobre uma quantidade de parâmetros bastante limitadas, como pode ser observado anteriormente. Mesmo baseado em poucas condições experimentais, as referências encontradas tratam da influência das correntes (principalmente no arco externo) sobre a geometria, ao passo que nada foi encontrado sobre a influência do comprimento livre de eletrodo e ângulo de ataque da tocha. Desta forma, este capítulo objetiva verificar a influência das correntes de soldagem, do ângulo de ataque da tocha e da distancia da tocha entre a peça sobre a geometria do cordão de solda.

6.2 Procedimento experimental

Para avaliar a influência das correntes dos circuitos do arco externo e do arco interno (MIG/MAG) na geometria do cordão de solda, foram realizadas soldagens de simples deposição sobre chapa ("bead-on-plate") com ambas as fontes reguladas para operar em polaridade positiva (CC+ ou polaridade inversa) e com característica estática no modo corrente constante. Foram utilizados valores de corrente no arco interno em três níveis (220,

250 e 280 A). Para a corrente no arco externo, foram avaliados quatro níveis (0, 40, 80 e 120 A). Foi ainda avaliada a influência da distância da tocha a peça em três níveis (10, 13 e 16 mm) e da posição da tocha também em três níveis (puxando, empurrando e reta). A combinação de todos estes parâmetros resultou em 28 condições de soldagem, como mostra a Tabela 6.1. Nessa tabela, são identificados três grupos de testes, no primeiro (Testes 1 a 12), são variadas as correntes no eletrodo consumível em três níveis (220, 250 e 280 A) e no arco externo em quatro níveis (0, 40, 80 e 120 A). Os experimentos com nível 0 no fator corrente do arco externo representam em essência uma soldagem MIG/MAG convencional (sem arco duplo) com corrente constante utilizando a tocha especial. Para o segundo grupo de testes (Testes 5 a 8 e testes 13 a 20), a Distâncias da Tocha a Peça (DTP) foi variada em três níveis (10, 13 e 16 mm). No terceiro grupo de testes (Testes 5 a 8 e testes 21 a 28) foram variadas as inclinações da tocha com o plano vertical em três níveis (0°, 15° puxando e 15° empurrando). Neste último grupo de testes, a DTP foi reduzida para as condições puxando e empurrando para manter um mesmo comprimento livre de eletrodo.

As condições gerais para a realização destas soldagens foram com uso de arame eletrodo de aço ao carbono ER 70S-6 com 1,2 mm de diâmetro, Ar como gás interno a 2 l/min, Ar como gás intermediário a 8 l/min e Ar+8%CO₂ como gás externo a 10 l/min.

Tabela 6.1 – Condições de soldagem para verificação da influência das correntes no arco externo e no arco interno, DTP e inclinação da tocha sobre os parâmetros geométricos do cordão de solda

Ensaio	Corrente no arco interno [A]	Corrente no Arco Externo [A]	DTP	Inclinação da tocha com o plano vertical	Vsold [cm/min]	Valim [m/min]
1	220	0	10	0°	19	6,5
2	220	40	10	0°	22	7,4
3	220	80	10	0°	25	8,3
4	220	120	10	0°	26	8,7
5	250	0	10	0°	20	6,8
6	250	40	10	0°	26	8,5
7	250	80	10	0°	27	9,1
8	250	120	10	0°	29	9,8
9	280	0	10	0°	26	8,4
10	280	40	10	0°	31	10,1
11	280	80	10	0°	31	10,2

Ensaio	Corrente no arco interno [A]	Corrente no Arco Externo [A]	DTP	Inclinação da tocha com o plano vertical	Vsold [cm/min]	Valim [m/min]
12	280	120	10	0°	32	10,4
13	250	0	13	0°	22	7,3
14	250	40	13	0°	28	9,3
15	250	80	13	0°	30	10,0
16	250	120	13	0°	32	10,6
17	250	0	16	0°	24	8,0
18	250	40	16	0°	30	10,1
19	250	80	16	0°	32	10,8
20	250	120	16	0°	36	11,4
21	250	0	10	15° puxando	20	6,8
22	250	40	10	15° puxando	26	8,5
23	250	80	10	15° puxando	27	9,1
24	250	120	10	15° puxando	29	9,8
25	250	0	10	15° empurrando	20	6,8
26	250	40	10	15° empurrando	26	8,5
27	250	80	10	15° empurrando	27	9,1
28	250	120	10	15° empurrando	29	9,8

DTP = Distância da Tocha a Peça; Vsol = Velocidade de Soldagem; Valim = Velocidade de Alimentação

Como a variação na velocidade de soldagem altera o volume da poça e, consequentemente, o tamanho do arco, as regulagens tanto da velocidade de soldagem quanto de alimentação foram feitas de forma interativa para que a relação entre elas fosse constante e o arco o mais curto possível. A relação *Velocidade de Soldagem/Velocidade de Alimentação* foi mantida igual a 3×10^{-2} , para possibilitar a comparação entre um mesmo volume de material depositado, para diferentes combinações dos parâmetros de soldagem. Esta regulagem foi realizada aumentando-se a velocidade de alimentação até que o arame tocasse na poça, gerando curtos-circuitos. A partir desse ponto, a velocidade de alimentação era reduzida suavemente até que o arame deixasse de tocar a poça de fusão e a transferência ocorresse de forma estável em voo livre.

Após a execução dos ensaios nas condições apresentadas na Tabela 6.1, as placas de teste foram devidamente identificadas para posterior análise. Como cada cordão de solda tem um comprimento de aproximadamente 150 mm, as seções transversais foram

retiradas em duas posições, no meio e a aproximadamente 30 mm do final do cordão, como indicado na Figura 6.5. Os corpos de prova foram então lixados e atacados com Nital a 10% para revelar as macroestruturas dos mesmos. Os parâmetros geométricos foram medidos de acordo com o esquema indicado na Figura 6.6.

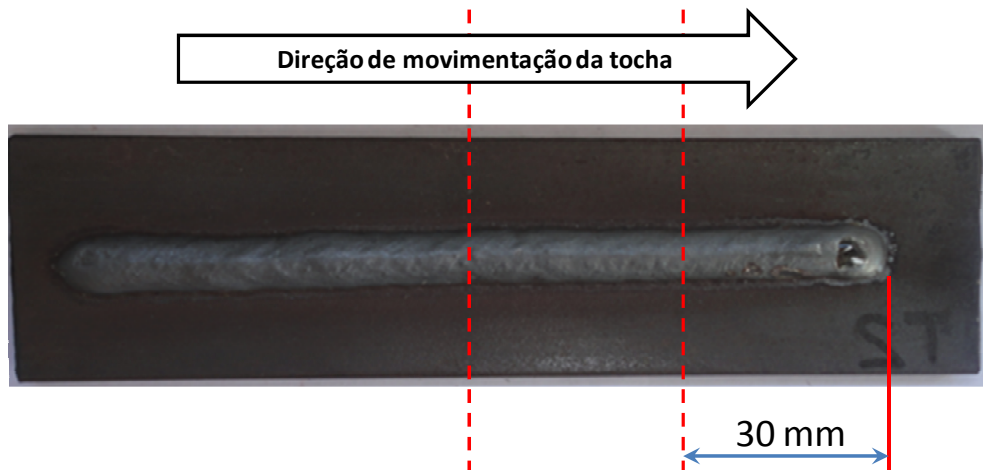


Figura 6.5 - Indicação das posições onde foram retiradas as seções transversais com relação a direção de soldagem

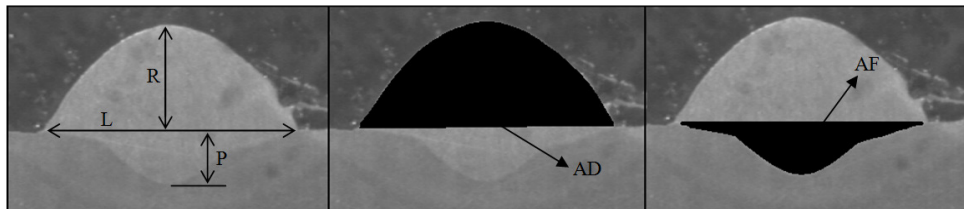


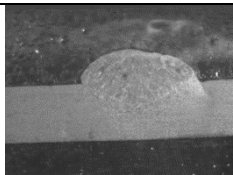
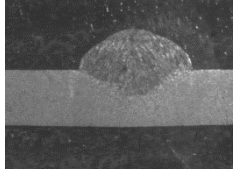
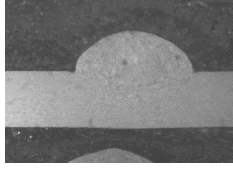
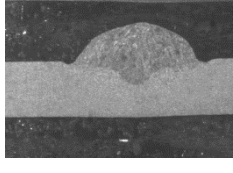
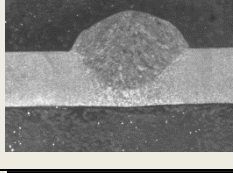
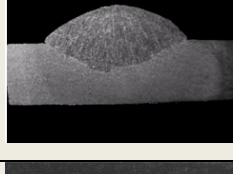
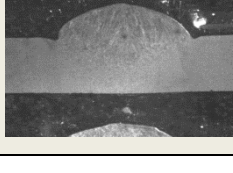
Figura 6.6 - Indicação dos parâmetros geométricos medidos nos cordões: L = Largura; R = Reforço; P=Penetração; AF = Área Fundida e AD = Área Depositada

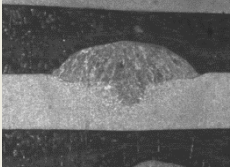
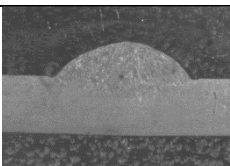
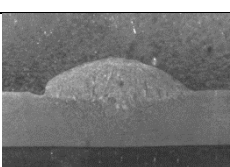
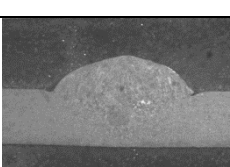
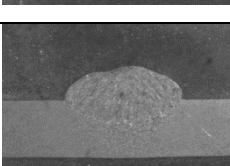
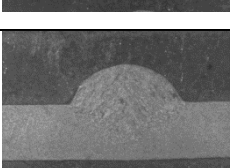
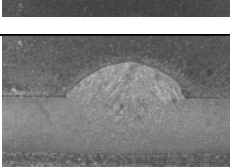
6.3 Resultados e Discussões

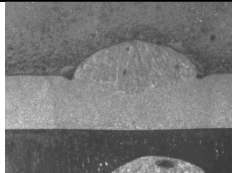
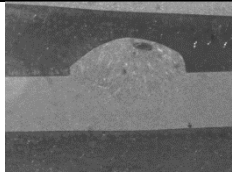
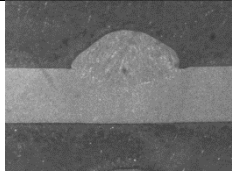
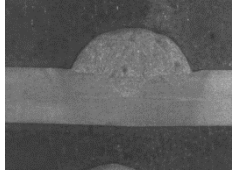
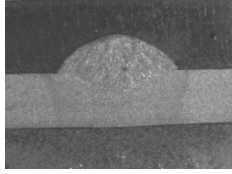
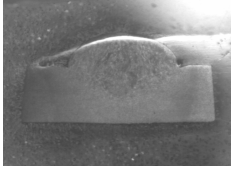
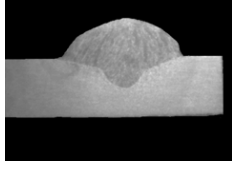
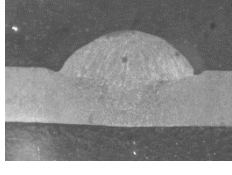
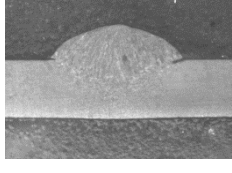
Na Tabela 6.2 estão apresentados os valores médios, com seus respectivos desvios padrões, dos sinais de corrente e tensão monitorados para os circuitos relativos ao arco interno e externo para cada um dos experimentos apresentados na Tabela 6.1. Os valores médios dos parâmetros geométricos do cordão de solda com os respectivos desvios padrões estão apresentados na Tabela 6.3. Para melhorar a apresentação dos resultados e facilitar a análise do comportamento do processo, esses parâmetros foram dispostos individualmente em forma de gráficos, que são apresentados na sequência. É importante ressaltar que não parece ter muito sentido a interpolação dos resultados entre as condições

sem corrente no arco externo e com corrente no arco externo, pois são dois processos diferentes. Assim, a análise vai ser feita pelo efeito da corrente no arco externo variando de 40 a 120 A, sob o efeito da variação da corrente no arco interno, comparativamente a uma condição do processo MIG/MAG convencional, com apenas um arco.

Tabela 6.2 - Valores médios dos sinais de corrente e tensão monitorados para os circuitos do arco interno e do arco externo (DTP e inclinação da tocha variam conforme Tabela 6.1)

Teste	$I_{ArcoInterno}$ [A]	$U_{ArcoInterno}$ [V]	$I_{ArcoExterno}$ [A]	$U_{ArcoExterno}$ [V]	Seção transversal
1	$220,7^{\pm 3,9}$	$30,4^{\pm 1,0}$	*	*	
2	$220,1^{\pm 4,0}$	$27,6^{\pm 1,2}$	$40,1^{\pm 1,9}$	$37,5^{\pm 2,8}$	
3	$220,4^{\pm 4,1}$	$29,6^{\pm 1,5}$	$79,2^{\pm 1,9}$	$33,1^{\pm 2,5}$	
4	$220,4^{\pm 4,0}$	$28,7^{\pm 1,4}$	$118,4^{\pm 2,0}$	$37,5^{\pm 3,2}$	
5	$250,6^{\pm 3,9}$	$27,7^{\pm 1,7}$	*	*	
6	$251,1^{\pm 4,0}$	$26,5^{\pm 1,1}$	$40,2^{\pm 1,9}$	$30,8^{\pm 2,9}$	
7	$250,3^{\pm 4,0}$	$28,9^{\pm 1,5}$	$79,4^{\pm 1,9}$	$35,1^{\pm 2,1}$	

Teste	$I_{ArcoInterno}$ [A]	$U_{ArcoInterno}$ [V]	$I_{ArcoExterno}$ [A]	$U_{ArcoExterno}$ [V]	Seção transversal
8	$250,5^{\pm 4,0}$	$25,0^{\pm 1,2}$	$117,3^{\pm 1,8}$	$33,4^{\pm 2,5}$	
9	$280,1^{\pm 4,1}$	$26,1^{\pm 1,9}$	*	*	
10	$281,1^{\pm 4,0}$	$27,8^{\pm 1,6}$	$40,6^{\pm 2,0}$	$34,9^{\pm 3,1}$	
11	$281,8^{\pm 3,9}$	$28,3^{\pm 1,4}$	$80,2^{\pm 1,8}$	$36,1^{\pm 2,9}$	
12	$280,6^{\pm 3,9}$	$25,0^{\pm 1,8}$	$117,5^{\pm 1,8}$	$35,7^{\pm 3,5}$	
13	$251,1^{\pm 4,0}$	$24,7^{\pm 1,7}$	*	*	
14	$250,9^{\pm 4,0}$	$28,7^{\pm 1,6}$	$40,2^{\pm 2,1}$	$39,1^{\pm 2,8}$	
15	$251,3^{\pm 3,9}$	$26,9^{\pm 1,7}$	$79,4^{\pm 1,9}$	$37,8^{\pm 3,1}$	

Teste	$I_{ArcoInterno}$ [A]	$U_{ArcoInterno}$ [V]	$I_{ArcoExterno}$ [A]	$U_{ArcoExterno}$ [V]	Seção transversal
16	$250,4^{\pm 4,0}$	$27,4^{\pm 1,3}$	$118,1^{\pm 2,0}$	$38,4^{\pm 2,8}$	
17	$251,1^{\pm 3,9}$	$24,7^{\pm 2,0}$	*	*	
18	$250,9^{\pm 4,0}$	$28,7^{\pm 1,2}$	$40,4^{\pm 2,2}$	$40,1^{\pm 2,9}$	
19	$251,3^{\pm 4,0}$	$26,9^{\pm 1,5}$	$78,9^{\pm 2,1}$	$41,4^{\pm 2,1}$	
20	$250,4^{\pm 4,0}$	$27,4^{\pm 1,8}$	$119,1^{\pm 2,2}$	$39,7^{\pm 2,4}$	
21	$250,6^{\pm 4,1}$	$26,7^{\pm 1,0}$	*	*	
22	$250,4^{\pm 4,0}$	$27,5^{\pm 1,6}$	$40,1^{\pm 2,0}$	$34,3^{\pm 2,7}$	
23	$250,8^{\pm 4,0}$	$26,3^{\pm 1,7}$	$79,4^{\pm 1,9}$	$36,1^{\pm 3,0}$	
24	$250,1^{\pm 3,9}$	$26,2^{\pm 1,5}$	$119,3^{\pm 1,9}$	$34,2^{\pm 2,0}$	

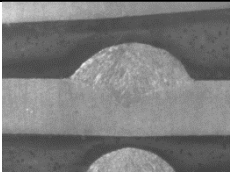
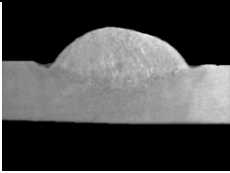
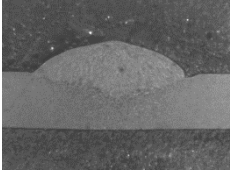
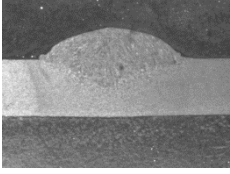
Teste	$I_{ArcoInterno}$ [A]	$U_{ArcoInterno}$ [V]	$I_{ArcoExterno}$ [A]	$U_{ArcoExterno}$ [V]	Seção transversal
25	$250,3^{\pm 3,8}$	$27,9^{\pm 1,5}$	*	*	
26	$250,1^{\pm 3,9}$	$24,4^{\pm 1,3}$	$41,4^{\pm 1,8}$	$30,8^{\pm 2,3}$	
27	$251,2^{\pm 3,9}$	$26,3^{\pm 1,5}$	$80,0^{\pm 1,8}$	$35,1^{\pm 2,8}$	
28	$250,3^{\pm 4,0}$	$26,8^{\pm 1,2}$	$116,1^{\pm 1,9}$	$34,4^{\pm 2,5}$	

Tabela 6.3 - Parâmetros geométricos medidos para os cordões de solda com desvio padrão relativo a duas medições (DTP e inclinação da tocha variam conforme Tabela 6.1)

Teste	Largura [mm]	Reforço [mm]	Penetração [mm]	Área Fundida [mm ²]	Área Depositada [mm ²]
1	$12,1^{\pm 0,8}$	$4,4^{\pm 0,4}$	$2,8^{\pm 0,4}$	$21,8^{\pm 4,6}$	$37,9^{\pm 2,1}$
2	$12,8^{\pm 0,1}$	$4,4^{\pm 0,4}$	$2,6^{\pm 0,1}$	$17,2^{\pm 1,8}$	$41,1^{\pm 0,8}$
3	$13,1^{\pm 0,4}$	$4,3^{\pm 0,2}$	$2,9^{\pm 0,1}$	$21,8^{\pm 0,8}$	$41,6^{\pm 3,2}$
4	$14,3^{\pm 0,8}$	$4,3^{\pm 0,2}$	$3,2^{\pm 0,1}$	$19,7^{\pm 0,7}$	$40,7^{\pm 1,4}$
5	$13,4^{\pm 0,1}$	$4,2^{\pm 0,1}$	$3,3^{\pm 0,1}$	$26,5^{\pm 2,1}$	$41,3^{\pm 1,1}$
6	$13,7^{\pm 0,1}$	$4,0^{\pm 0,1}$	$2,8^{\pm 0,3}$	$21,5^{\pm 2,1}$	$37,9^{\pm 1,5}$
7	$15,3^{\pm 0,7}$	$3,8^{\pm 0,1}$	$3,2^{\pm 0,4}$	$24,9^{\pm 1,6}$	$39,4^{\pm 0,9}$
8	$16,3^{\pm 0,4}$	$3,8^{\pm 0,1}$	$3,8^{\pm 0,1}$	$24,1^{\pm 1,2}$	$41,3^{\pm 1,0}$
9	$14,4^{\pm 0,1}$	$3,9^{\pm 0,4}$	$3,7^{\pm 0,3}$	$32,3^{\pm 1,0}$	$37,5^{\pm 4,4}$
10	$15,4^{\pm 0,1}$	$4,0^{\pm 0,1}$	$3,2^{\pm 0,3}$	$24,1^{\pm 5,2}$	$41,6^{\pm 0,5}$
11	$16,4^{\pm 0,3}$	$3,7^{\pm 0,1}$	$3,5^{\pm 0,5}$	$27,9^{\pm 3,9}$	$42,3^{\pm 0,6}$
12	$16,5^{\pm 1,0}$	$3,8^{\pm 0,1}$	$4,0^{\pm 0,2}$	$31,4^{\pm 3,6}$	$41,4^{\pm 0,8}$
13	$13,1^{\pm 0,1}$	$4,2^{\pm 0,1}$	$3,3^{\pm 0,2}$	$26,8^{\pm 1,6}$	$40,1^{\pm 2,8}$

Teste	Largura [mm]	Reforço [mm]	Penetração [mm]	Área Fundida [mm ²]	Área Depositada [mm ²]
14	12,6 ^{±0,4}	4,3 ^{±0,1}	2,8 ^{±0,3}	17,9 ^{±1,1}	38,9 ^{±2,6}
15	13,7 ^{±0,1}	4,1 ^{±0,1}	3,1 ^{±0,2}	19,3 ^{±1,2}	39,3 ^{±0,3}
16	14,4 ^{±0,5}	4,0 ^{±0,1}	3,3 ^{±0,1}	21,2 ^{±3,2}	39,8 ^{±2,1}
17	12,9 ^{±0,2}	4,3 ^{±0,1}	3,2 ^{±0,1}	23,4 ^{±1,1}	38,7 ^{±2,4}
18	12,4 ^{±0,1}	4,5 ^{±0,1}	2,7 ^{±0,4}	16,0 ^{±1,3}	39,2 ^{±3,9}
19	13,0 ^{±0,9}	4,3 ^{±0,2}	3,1 ^{±0,2}	16,7 ^{±1,1}	41,0 ^{±4,4}
20	13,2 ^{±0,6}	4,2 ^{±0,1}	3,5 ^{±0,1}	18,9 ^{±1,9}	36,5 ^{±3,9}
21	12,9 ^{±0,6}	4,4 ^{±0,2}	3,5 ^{±0,3}	23,5 ^{±0,7}	37,7 ^{±5,1}
22	13,2 ^{±0,3}	4,3 ^{±0,2}	3,3 ^{±0,1}	21,0 ^{±1,4}	39,9 ^{±0,3}
23	14,6 ^{±0,1}	4,2 ^{±0,1}	3,8 ^{±0,4}	24,0 ^{±1,5}	42,3 ^{±2,1}
24	14,9 ^{±0,1}	4,0 ^{±0,1}	4,0 ^{±0,4}	25,2 ^{±4,0}	39,7 ^{±2,0}
25	14,0 ^{±1,0}	3,9 ^{±0,2}	3,0 ^{±0,7}	23,5 ^{±0,7}	40,1 ^{±0,6}
26	15,2 ^{±0,1}	3,7 ^{±0,2}	2,7 ^{±0,1}	21,6 ^{±2,3}	40,7 ^{±0,9}
27	16,4 ^{±0,1}	3,6 ^{±0,2}	3,0 ^{±0,1}	24,0 ^{±1,4}	40,5 ^{±0,4}
28	16,7 ^{±0,4}	3,5 ^{±0,1}	3,2 ^{±0,1}	25,8 ^{±2,9}	39,0 ^{±0,7}

6.3.1 *Análise dos parâmetros geométricos do cordão de solda em função da corrente no arco externo para diferentes níveis de corrente no eletrodo consumível (arco interno)*

Na sequência são apresentadas as tendências da variação dos parâmetros geométricos em função das correntes no arco externo e no eletrodo consumível (arco interno). Na Figura 6.7, pode-se verificar uma tendência de aumento da largura do cordão de solda com o aumento da corrente no externo (para um mesmo volume de material depositado por unidade de comprimento), independentemente da corrente no eletrodo consumível, resultados que estão de acordo com Essers et al. (1975), Oliveira (2006), Ono et al. (2009) e Resende (2009). Há também uma tendência do aumento da largura quando se aumenta a corrente no eletrodo consumível, para uma dada corrente no arco externo.

Quando a solda é realizada sem a presença do arco externo, o aquecimento do metal de base é resultado apenas do arco interno (processo MIG/MAG convencional). Assim, a adição de corrente no arco externo provoca maior aquecimento da chapa, consequentemente favorecendo a molhabilidade (a largura do cordão aumenta). Quanto maior essa corrente, maior o seu efeito. Efeito similar acontece quando a corrente no arco interno é aumentada no processo; o arco formado aumenta a área de contato com a peça,

que por consequência, aumenta a área da superfície da chapa aquecida, aumentando a molhabilidade da mesma, resultando em cordões mais largos.

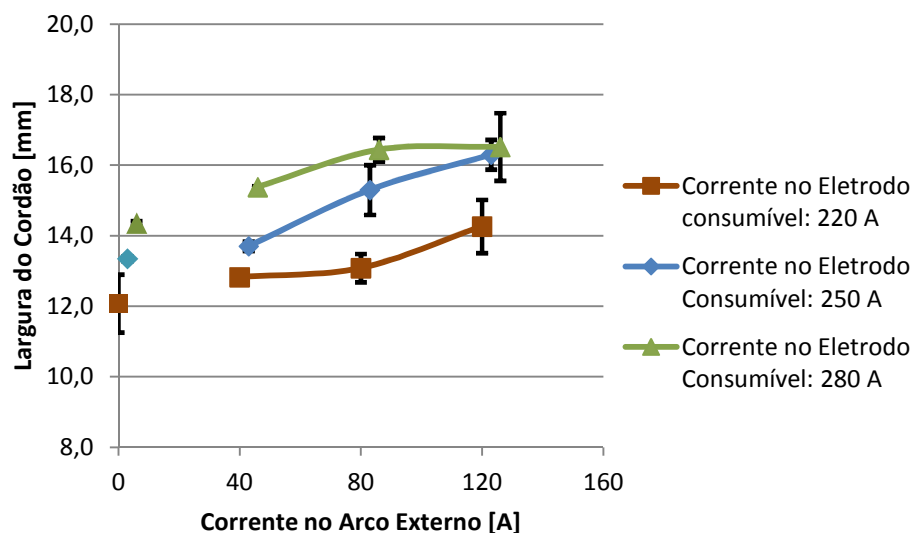


Figura 6.7 – Largura do cordão de solda para o processo "Plasma-MIG" com Arcos Concêntricos em função da corrente no arco externo para três condições de corrente no eletrodo consumível e uma DTP de 10 mm (alguns pontos foram levemente deslocados na horizontal para permitir a visualização das barras de erro)

De forma coerente, é possível observar na Figura 6.8 uma leve tendência de redução no reforço do cordão de solda com o aumento da corrente no arco externo e no eletrodo consumível. Essa é uma consequência direta do aumento da molhabilidade (aumenta a largura do cordão e reduz o reforço). Estes resultados também estão de acordo com Essers et al. (1975), Oliveira (2006), Ono et al. (2009) e Resende (2009).

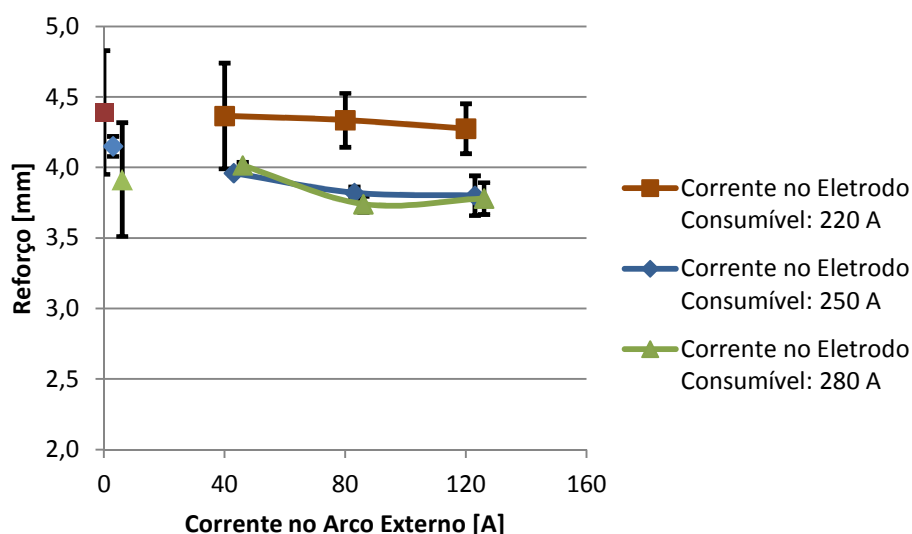


Figura 6.8 - Reforço do cordão de solda para o processo "Plasma-MIG" com Arcos Concêntricos em função da corrente no arco externo para três condições de corrente no eletrodo consumível e uma DTP de 10 mm (alguns pontos foram levemente deslocados na horizontal para permitir a visualização das barras de erro)

No que diz respeito a penetração, pela Figura 6.9 podem ser observados dois momentos, sugerindo que a ação de aumento de calor não governa o fenômeno. Num primeiro momento, ao se adicionar a corrente externa com valores bem baixos (40 A), a área de acoplamento do arco cresce, reduzindo a concentração da corrente, dificultando a fusão no sentido da espessura. A segunda possibilidade pode estar relacionada com a força do jato de plasma, que pode ter se reduzido também como uma consequência do aumento do volume do arco, principalmente na região do arame. Ainda outra explicação é encontrada nos resultados de Essers e Walter (1981), os quais verificaram que a presença do arco externo reduz o calor que é imposto à chapa (curvas *c* e *d* da Figura 6.4), para uma mesma corrente total. Essers e Walter (1981) associaram esta maior perda de calor ao sistema de refrigeração do eletrodo não consumível. Esta redução de calor imposto observada pelos autores pode ser consequência do aumento de área total do arco provocado pelo arco externo (neste caso, a concentração de calor na chapa é reduzida, dificultando a penetração). Todos esses mecanismos levam como consequência à redução da penetração do cordão de solda para corrente externa em valores baixos (40 A). Ao se aumentar a corrente no arco externo, esses efeitos vão se contrabalançando com o do aumento da energia, que mesmo menos concentrada passa a ser maior; assim, a penetração e área fundida aumentam proporcionalmente com a corrente externa.

Ainda na Figura 6.9, pode se observar um aumento na penetração com o aumento da corrente no arco interno (maior energia) independentemente da corrente externa (similarmente ao efeito sobre a largura e reforço), demonstrando que o efeito da corrente no arco externo age de forma independente.

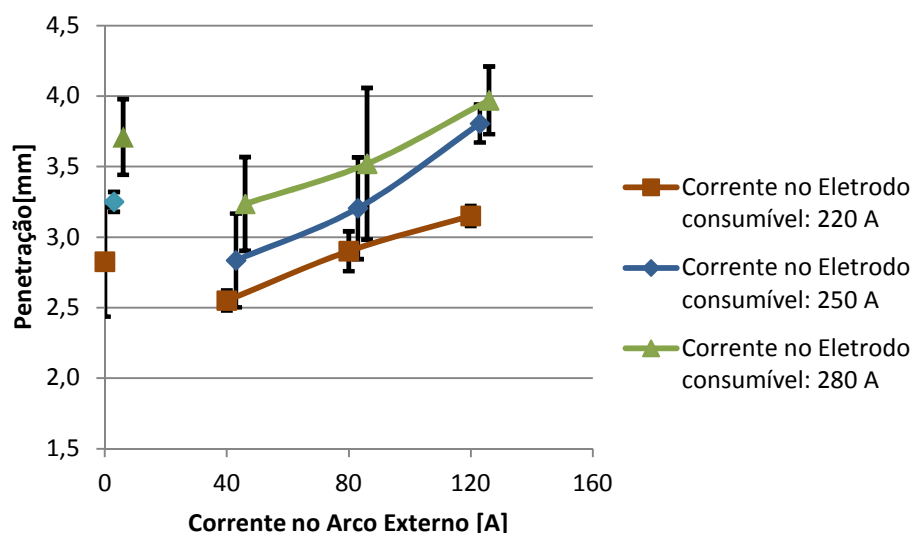


Figura 6.9 - Penetração do cordão de solda para o processo "Plasma-MIG" com Arcos Concêntricos em função da corrente no arco externo para três condições de corrente no eletrodo consumível e uma DTP de 10 mm (alguns pontos foram levemente deslocados na horizontal para permitir a visualização das barras de erro)

Quando os valores relacionados ao momento efetivo (Figura 5.31 – Capítulo 5) são analisados, era de se esperar um aumento na penetração quando adicionado o valor mínimo de corrente no arco externo (40 A), o que não foi observado na Figura 6.9. Isso faz concluir que os efeitos da redução de rendimento térmicos (apresentados por ESSERS; WALTER, 1981), relacionados à perda de calor pelo sistema de refrigeração, predominam. Por outro lado, quando a corrente no arco externo é aumentada ainda mais, a penetração aumenta, assim como o momento efetivo (Figura 5.31), predominando agora o efeito mecânico das gotas sobre o cordão de solda.

Na Figura 6.10 é apresentada a variação da área fundida, que apresenta comportamento similar ao da penetração, uma vez que ambos os parâmetros geométricos são governados pelos mesmos mecanismos.

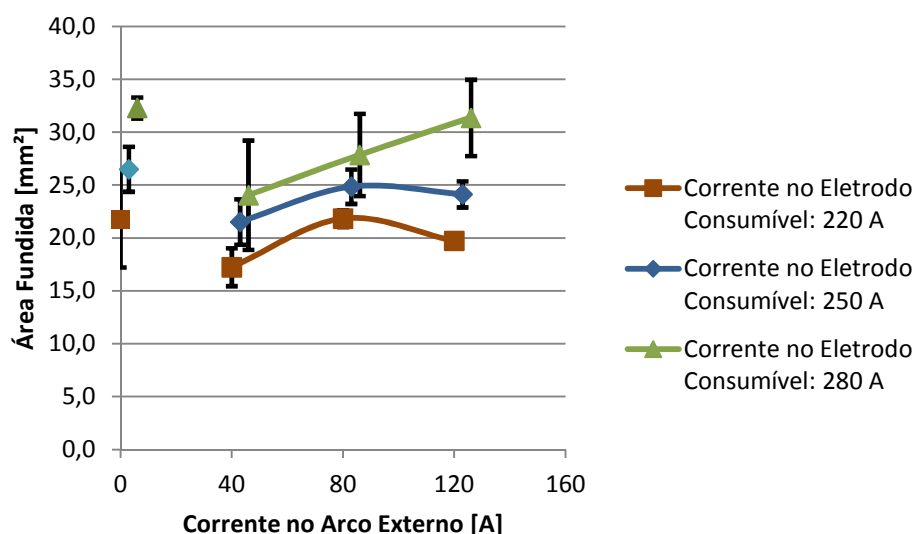


Figura 6.10 – Área fundida no metal de base para o processo "Plasma-MIG" com Arcos Concêntricos em função da corrente no arco externo para três condições de corrente no eletrodo consumível e uma DTP de 10 mm (alguns pontos foram levemente deslocados na horizontal para permitir a visualização das barras de erro)

6.3.2 Análise dos parâmetros geométricos do cordão de solda em função da corrente no arco externo para diferentes DTP (Distâncias da Tocha a Peça)

Nas figuras apresentadas neste item, observa-se que o efeito da corrente do arco externo sobre a geometria do cordão mantém a mesma tendência já analisada no item 6.3.1. Deve-se ressaltar que os experimentos cujos resultados foram apresentados no item 6.3.1 são para uma DTP de 10 mm. Ou seja, as mesmas tendências para DTP de 10 mm foram observadas para as DTP de 13 a 16 mm. Assim, as mesmas relações de causa e efeito para a influência da corrente, apresentadas no item 6.3.1, são válidas aqui.

Em relação ao afeito da DTP, ilustrado na Figura 6.11, quando está soldando sem o arco externo (processo MIG/MAG convencional), apesar de não apresentar diferenças marcantes, quanto maior a DTP, menor a largura do cordão de solda. Como o comprimento do arco é mantido aproximadamente constante, maiores DTP implicam em um maior comprimento livre de eletrodo, o que demanda uma maior velocidade de alimentação do arame para os mesmos valores de corrente. Para manter a relação entre velocidade de soldagem e velocidade de alimentação constante, é necessário, então, aumentar a velocidade de soldagem, resultando em um menor aquecimento do metal de base por unidade de comprimento, com reflexos sobre a molhabilidade, que por sua vez produz cordões mais convexos e com menores larguras.

Ainda em relação à Figura 6.11, quando é adicionado o arco externo, a tendência de se obter maiores larguras de cordão para menores DTP é mantida e evidenciada. Vale destacar que o efeito da corrente externa sobre a largura do cordão se torna menos sensível quando a DTP é aumentada. Isto acontece porque ao aumentar a DTP a DBCP (Distância entre o Bico de Contato e a Peça) também aumenta. Como o comprimento do arco é mantido aproximadamente constante, tem-se um maior comprimento livre de eletrodo, o que demanda uma maior velocidade de alimentação do arame para os mesmos valores de corrente (por exemplo, para 80 A de corrente no arco externo e 250 A no arco interno, tem-se 9,1, 10,0 e 10,8 m/min, respectivamente para DTP de 10, 13 e 16 mm, sendo que demais valores podem ser consultados na Tabela 6.1). Com isso, o efeito de aumentar a largura em função do aumento da corrente no arco externo (aumento da energia) é contrabalanceado com o efeito de reduzir a largura em função da maior velocidade de soldagem.

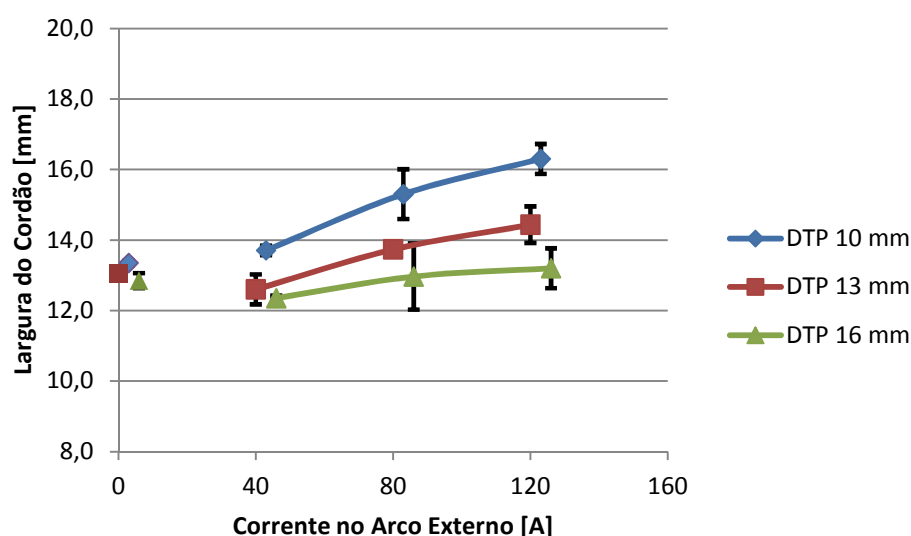


Figura 6.11 - Largura do cordão de solda para o processo "Plasma-MIG" com Arcos Concêntricos em função da corrente no arco externo para três condições de Distância entre a Tocha e a Peça (DTP) e corrente no arco interno de 250 A (alguns pontos foram levemente deslocados na horizontal para permitir a visualização das barras de erro)

Na Figura 6.12 é observado para o reforço um comportamento oposto ao verificado na largura, uma vez que todos os cordões de solda possuem o mesmo volume e estes dois parâmetros geométricos são regidos pelos mesmos mecanismos.

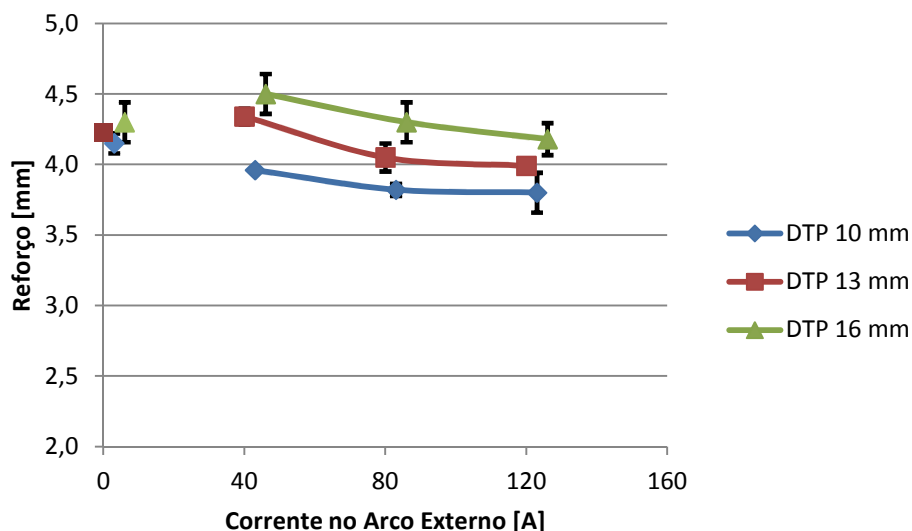


Figura 6.12 – Reforço do cordão de solda para o processo "Plasma-MIG" com Arcos Concêntricos em função da corrente no arco externo para três condições de Distância entre a Tocha e a Peça (DTP) e corrente no arco interno de 250 A (alguns pontos foram levemente deslocados na horizontal para permitir a visualização das barras de erro)

Na Figura 6.13 é observado que o aumento da DTP influi muito pouco sobre a relação corrente de arco externo e penetração, já mostrada na Figura 6.9. Há apenas uma tendência de haver maior penetração para a menor DTP em valores maiores de corrente externa. Mas, como ilustra a Figura 6.14, o efeito da DTP é mais nítido quando se analisa o comportamento da corrente externa sobre a área fundida. Apesar de não se mudar as tendências do efeito da corrente externa sobre a penetração, já apontadas na Figura 6.10, quanto maior a DTP, menor se torna a área fundida.

Os resultados para penetração e área fundida podem ser entendidos uma vez que, quanto maior a DTP, maior o comprimento livre de eletrodo submetido ao aquecimento por efeito joule, que por sua vez contribui na taxa de fusão do eletrodo. Desta forma, maiores velocidades de soldagem são requeridas para manter constante sua relação com a velocidade de soldagem, resultando em menor aquecimento do metal de base com efeito na redução da penetração e área fundida.

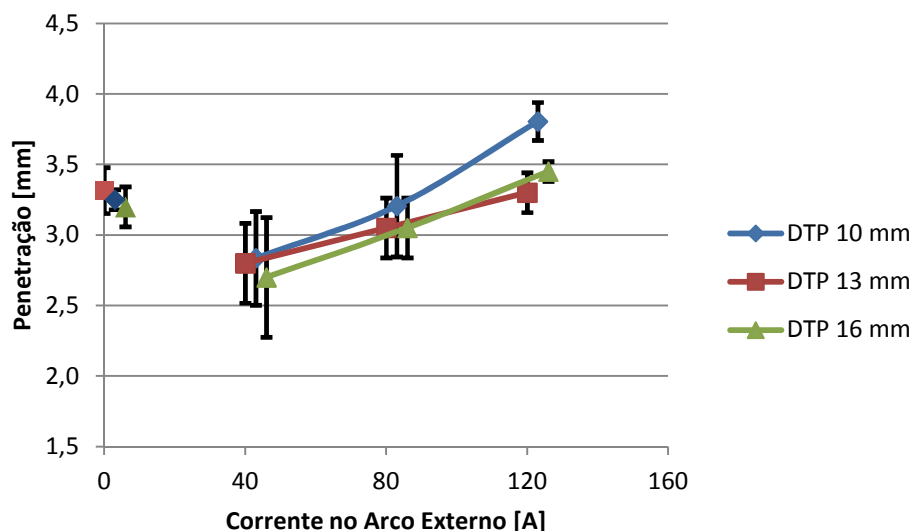


Figura 6.13 - Penetração do cordão de solda para o processo "Plasma-MIG" com Arcos Concêntricos em função da corrente no arco externo para três condições de Distância entre a Tocha e a Peça (DTP) e corrente no arco interno de 250 A (alguns pontos foram levemente deslocados na horizontal para permitir a visualização das barras de erro)

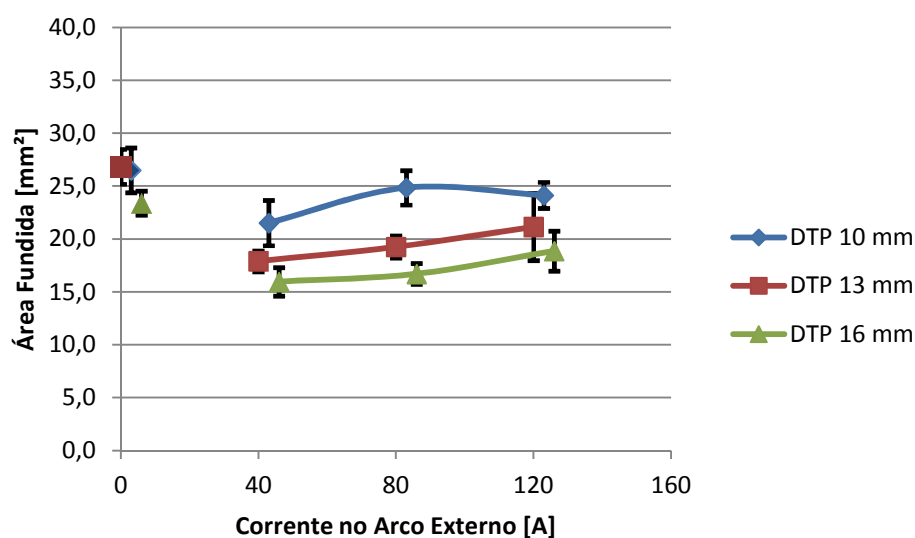


Figura 6.14 - Área fundida no metal de base para o processo "Plasma-MIG" com Arcos Concêntricos em função da corrente no arco externo para três condições de Distância entre a Tocha e a Peça (DTP) e corrente no arco interno de 250 A (alguns pontos foram levemente deslocados na horizontal para permitir a visualização das barras de erro)

6.3.3 Análise dos parâmetros geométricos do cordão de solda em função da corrente no arco externo para diferentes inclinações da tocha

De forma análoga ao item 6.2.2, a inclinação da tocha (ângulo de ataque) não modifica a tendência da ação da corrente do arco externo sobre a geometria do cordão, já constatada nos itens 6.3.1 e 6.3.2. Ressalta-se que os experimentos cujos resultados foram apresentados nesses itens são para uma DTP de 10 mm e ângulo reto (tocha perpendicular à chapa).

Mas o ângulo da tocha influi sobre os valores de largura, reforço, penetração e área fundida. Na Figura 6.15, para o processo MIG/MAG convencional (0 A de corrente no arco externo), considerando como referência a tocha reta, a tocha (arco) empurrando produz cordões com maior largura e a tocha puxando, cordões com menor largura. Isto acontece devido ao pré-aquecimento que o arco provoca à frente da poça fundida quando o arco está empurrando, aumentando a molhabilidade e favorecendo o aumento da largura do cordão. Quando corrente no arco externo é adicionada ao processo, a largura aumenta para as três condições de inclinação da tocha, como resultado do aumento da energia acrescentada ao processo.

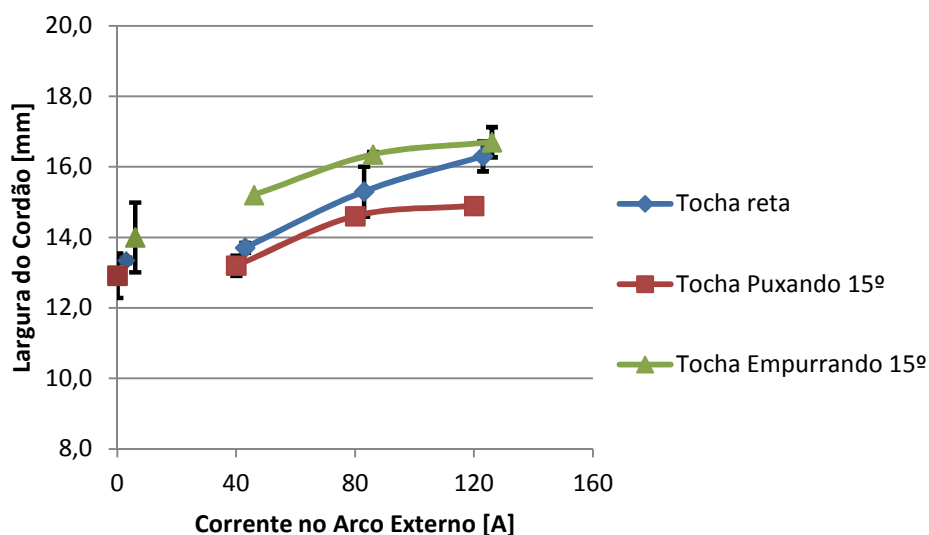


Figura 6.15 - Largura do cordão de solda para o processo "Plasma-MIG" com Arcos Concêntricos em função da corrente no arco externo para três condições de Inclinação da tocha e corrente no arco interno de 250 A (alguns pontos foram levemente deslocados na horizontal para permitir a visualização das barras de erro)

A Figura 6.16 mostra a variação do reforço do cordão de solda que apresenta um comportamento oposto ao verificado na largura, uma vez que todos os cordões de solda

possuem o mesmo volume e estes dois parâmetros geométricos são regidos pelos mesmos mecanismos.

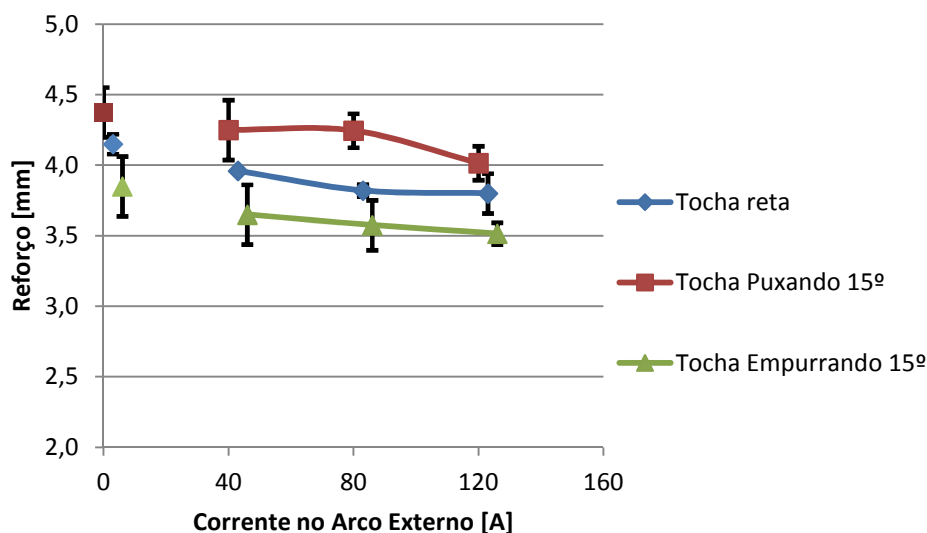


Figura 6.16 - Reforço do cordão de solda para o processo "Plasma-MIG" com Arcos Concêntricos em função da corrente no arco externo para três condições de inclinação da tocha e corrente no arco interno de 250 A (alguns pontos foram levemente deslocados na horizontal para permitir a visualização das barras de erro)

Na Figura 6.17 é possível observar um aumento na penetração à medida que a tocha passa de empurrando para puxando. Este efeito pode ser justificado pelo fato do jato de plasma empurrar a poça fundida para trás no modo puxando, de tal forma que o aquecimento da chapa pelo acoplamento do arco com a peça se torna mais eficiente (age mais no fundo da poça). Além disso, existe a ação das gotas em transferência diretamente para a região mais aquecida da chapa, localizada no fundo da poça.

Em relação à área fundida, a princípio era de se esperar um comportamento similar ao observado para a penetração nos resultados mostrados na Figura 6.18. No entanto, as curvas estão praticamente sobrepostas, o que pode ser entendido ao observar a Figura 6.19, onde mostra que na condição puxando o perfil do cordão de solda foi alterado progressivamente de um formato do tipo “prato fundo” para o do tipo “cálice”, que favorece o aumento da penetração, mas com pouco efeito sobre a área fundida.

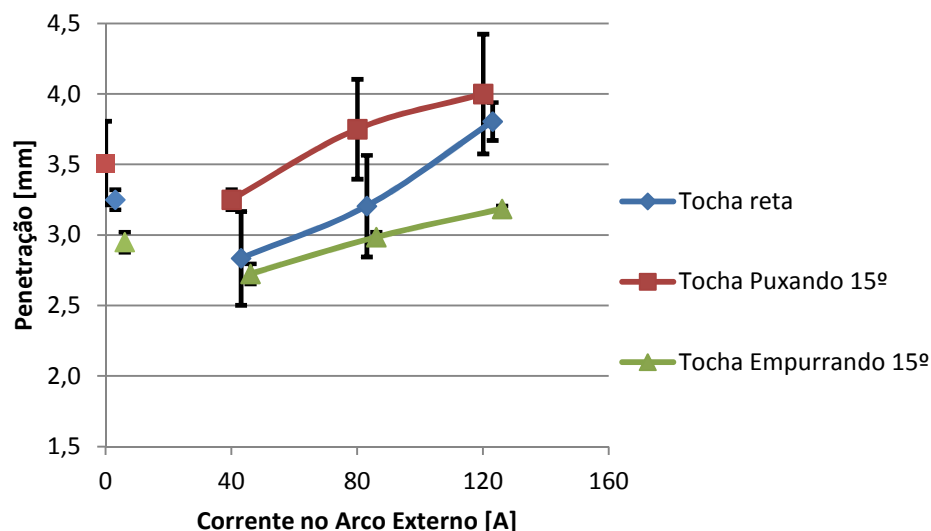


Figura 6.17 – Penetração do cordão de solda para o processo "Plasma-MIG" com Arcos Concêntricos em função da corrente no arco externo para três condições de inclinação da tocha e corrente no arco interno de 250 A (alguns pontos foram levemente deslocados na horizontal para permitir a visualização das barras de erro)

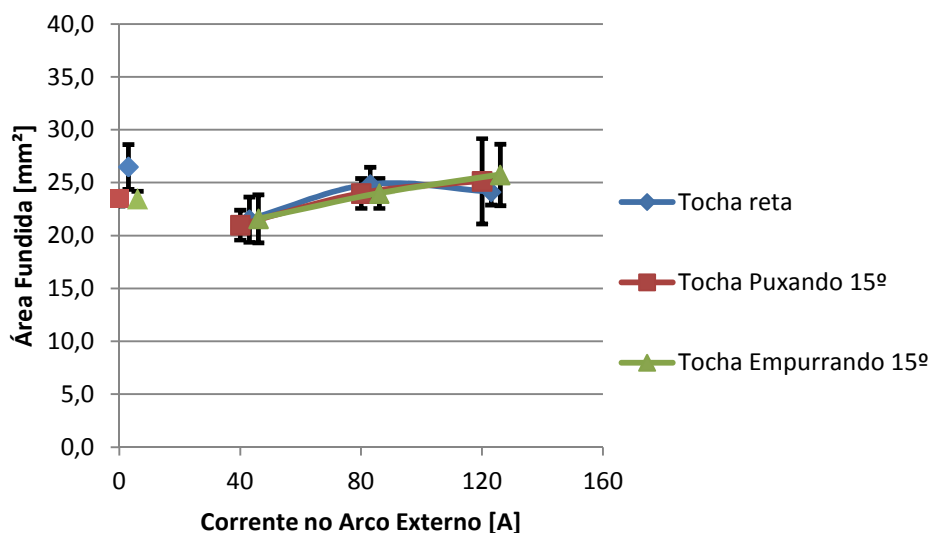


Figura 6.18 - Área fundida no metal de base para o processo "Plasma-MIG" com Arcos Concêntricos em função da corrente no arco externo para três condições de Inclinação da tocha e corrente no arco interno de 250 A (alguns pontos foram levemente deslocados na horizontal para permitir a visualização das barras de erro)

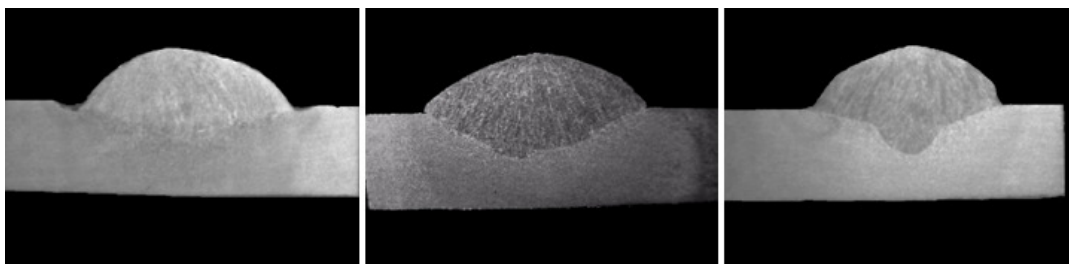


Figura 6.19 – Seções transversais para soldagem com 250 A de corrente no arame e 40 A no arco externo para as condições empurrando (esquerda), tocha reta (centro) e puxando (direita)

6.4 Considerações do Capítulo

Ao observar o conjunto de resultados apresentados neste capítulo (e sempre lembrando que, independente dos parâmetros, a taxa de deposição por unidade de comprimento da solda foi a mesma), pode ser verificada uma relação bastante consistente entre a corrente no arco externo e os parâmetros geométricos avaliados, independentemente dos valores de corrente no arco interno, distância entre a tocha e a peça e ângulo de inclinação da tocha. Maiores larguras, menores reforços, maiores penetrações e maiores áreas fundidas são alcançadas ao se usar maiores valores de corrente externa. Mas para a penetração e área fundida, foi observado um ponto de mínimo com a corrente externa em torno de 40 A, considerando que sem corrente externa os valores da penetração e área fundida são maiores e voltam a crescer com o aumento da corrente externa (superando o valor para quando a corrente externa inexistente) a partir do ponto de mínimo. A capacidade de se reduzir a área fundida, conseqüentemente a diluição, é um indicativo de que o processo possui potencialidades para ser aplicado em operações que exijam uma menor diluição, como por exemplo, em revestimentos.

Estas constatações são importantes para o usuário do processo, que de forma geral, tem um indicativo de como variar os parâmetros aqui avaliados para modificar o perfil cordão de solda para melhor atender as suas necessidades.

Mas outros parâmetros também influem sobre a geometria do cordão, como a corrente no arco interno, a distância entre a tocha e a peça e o ângulo de inclinação da tocha. De forma geral, maiores larguras de cordão são também obtidas com maiores correntes no arco interno, menor distância da tocha até a peça (não é recomendado utilizar valores abaixo de 10 mm) e a tocha na condição empurrando. Maiores reforços de cordão são obtidas com menores correntes no arco interno, maior distância da tocha até a peça e a

tocha na condição puxando. Maiores penetrações são obtidas para maiores correntes no arco interno, menor distância da tocha à peça e tocha na condição puxando. Maiores valores para a área fundida são também obtidas para maiores valores de corrente no arco interno com menor distância entre a tocha e a peça, mas a inclinação da tocha, para as condições avaliadas, não promoveu mudança na área fundida em função da mudança do perfil do cordão de solda.

CAPÍTULO VII

INFLUÊNCIA DAS CORRENTES NO ARCO EXTERNO E NO ELETRODO CONSUMÍVEL SOBRE A TRANSIÇÃO GOTICULAR AXIAL E GOTICULAR ROTACIONAL

7.1 Introdução

Com a necessidade de aumentar a produtividade, os processos de soldagem têm sido cada vez mais submetidos a condições extremas de operação. No caso do processo MIG/MAG, se a corrente através do arame é aumentada acima dos valores da corrente de transição globular goticular axial, a transição goticular rotacional pode ser atingida, e, acima dela, uma parte do comprimento livre do eletrodo se torna viscosa e começa a rotacionar. Essers; Jelmorini; Tichelaar (1972) apresentam uma imagem de transferência rotacional para o processo "Plasma-MIG" com Arcos Concêntricos (Figura 7.1(a)), similar a que é apresentada por Scotti et al. (2012) referente ao processo MIG/MAG (Tabela 5.1).

De acordo com Essers; Jelmorini; Tichelaar (1972), o arco externo é capaz de promover uma transferência do tipo rotacional com uma quantidade reduzida de respingos, fazendo com que a faixa de utilização desse tipo de transferência no processo "Plasma-MIG" com Arcos Concêntricos seja mais ampla se comparada à obtida com o processo MIG/MAG convencional, como pode ser observado pelas Figura 7.2 e Figura 7.3.

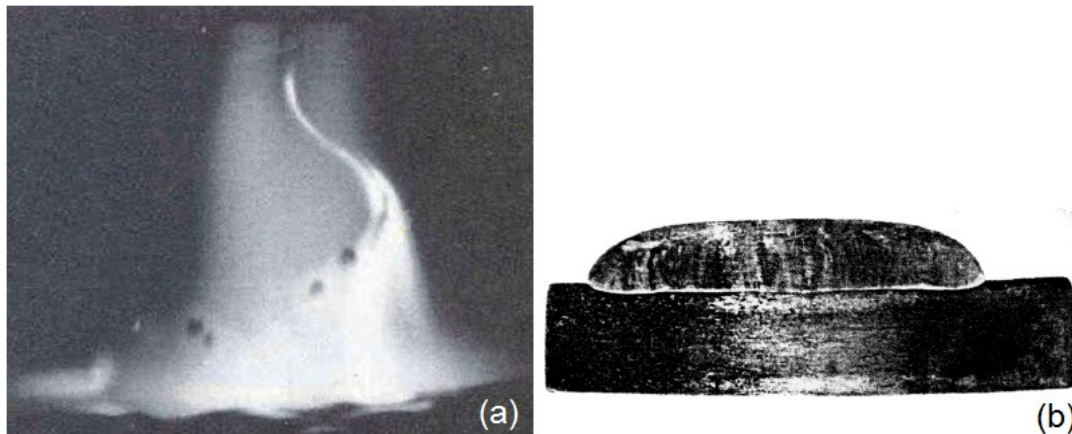


Figura 7.1 – (a) Transferência goticular rotacional na soldagem "Plasma-MIG" com Arcos Concêntricos com eletrodos na polaridade positiva (corrente no arco externo de 120 A à 45V e corrente MIG/MAG de 300A à 35V, com arame de aço inoxidável de 0,8 mm); (b) seção transversal do corpo de prova obtido em (a) (ESSERS; JELMORINI; TICHELAAAR, 1972)

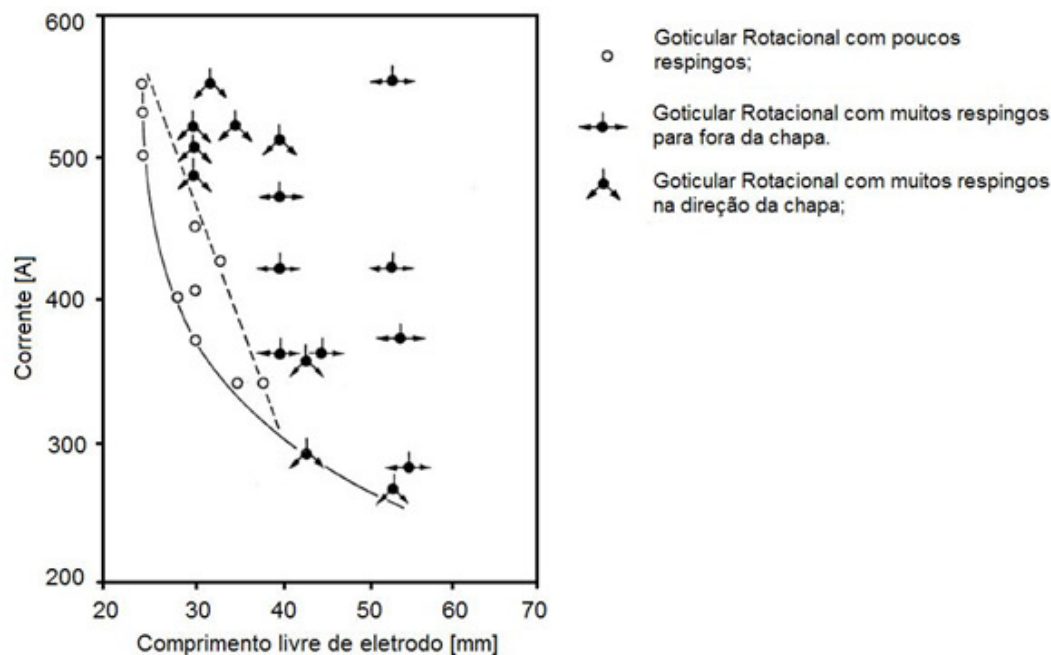


Figura 7.2 – Corrente de transição de goticular axial para goticular rotacional e quantidade de respingos para goticular rotacional no processo MIG/MAG para eletrodo de aço ao carbono com 1,2 mm (ESSERS; JELMORINI; TICHELAAAR, 1972)

A Figura 7.4 mostra a taxa de deposição conseguida para os processos MIG/MAG convencional e "Plasma-MIG" com Arcos Concêntricos operando no modo de transferência rotacional com um nível aceitável de respingos em função da corrente de soldagem. Esses resultados, de alta taxa de fusão e baixa penetração, indicam que o processo tem também

um grande potencial para aplicações de revestimentos. Também é importante observar que o processo "Plasma-MIG" com Arcos Concêntricos opera com maiores comprimentos de eletrodo energizado, se comparado ao processo MIG/MAG, o que favorece o aumento na taxa de deposição devido ao aquecimento por efeito joule.

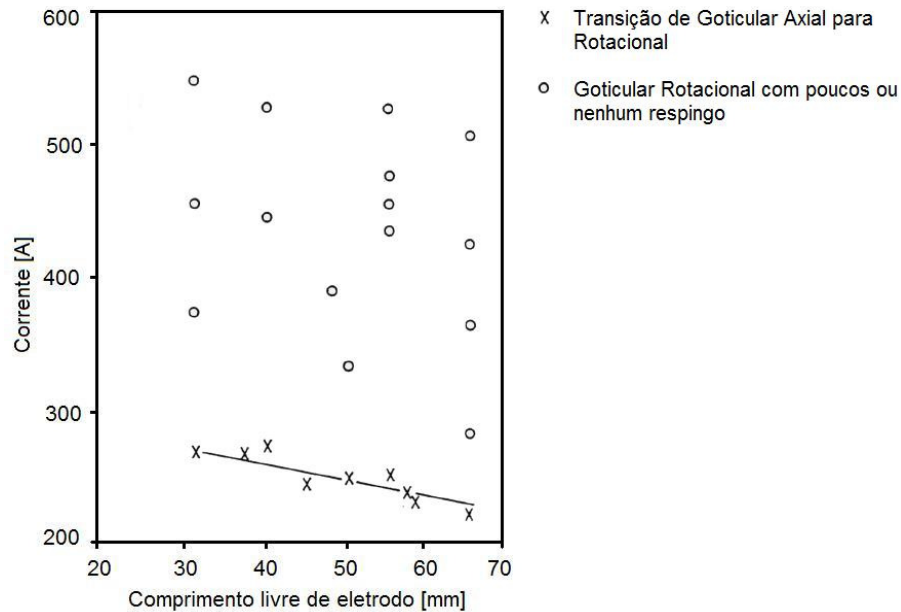


Figura 7.3 - Corrente de Transição de Goticular Axial para Goticular Rotacional no processo Plasma-MIG para eletrodo de aço ao carbono com 1,2 mm (ESSERS; JELMORINI; TICHELAR, 1972)

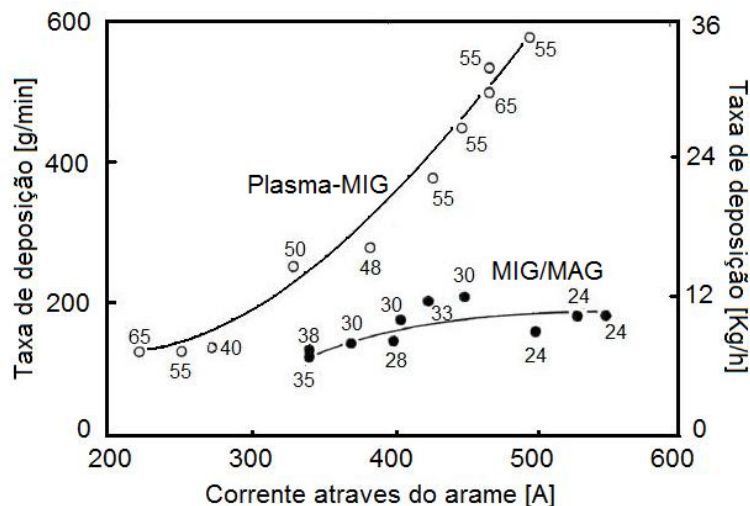


Figura 7.4 – Taxa de deposição para os processos "Plasma-MIG" com Arcos Concêntricos (Plasma-MIG) e MIG/MAG convencional em transferência goticula rotacional sem respingos em função do corrente através do arame para diversos comprimentos de eletrodo energizado, indicados para cada ponto (ESSERS; JELMORINI; TICHELAR, 1972)

Desta forma, este capítulo tem o objetivo de identificar a corrente de transição entre os modos goticular axial e goticular rotacional para os processos MIG/MAG convencional e "Plasma-MIG" com Arcos Concêntricos. Esta identificação visa avaliar os efeitos da transferência rotacional no processo "Plasma-MIG" com Arcos Concêntricos sobre o rendimento de deposição e geometria do cordão de solda.

7.2 Procedimentos experimentais

Para identificar a corrente de transição entre os modos goticular axial e goticular rotacional, foram realizadas soldagens de simples deposição sobre chapa (*"bead-on-plate"*), utilizando a montagem experimental para soldagem "Plasma-MIG" com arcos concêntricos. O arco externo foi avaliado para duas condições, 100 A de corrente e 0 A de corrente (Processo MIG/MAG convencional). Para as duas condições, a corrente no arco interno foi variada, de forma a se obter transferências tipicamente goticulares rotacionais.

A tocha comercial utilizada (modelo PLM 900 de fabricação da empresa TBi) apresentava um recuo do eletrodo do arco externo (RP) e recuo do eletrodo MIG/MAG (RM), respectivamente, iguais a 10,5 e 18 mm. Já para o valor da distância da tocha até a peça (DTP), foi utilizado 14 mm, resultando em uma distância do bico de contato MIG/MAG à peça (DBCP) de 32 mm. O arame-eletrodo usado foi de aço ao carbono da classe AWS ER70S-6, com 1,2 mm de diâmetro, aplicando-se Ar como gás interno a 5 l/min, Ar como gás intermediário a 10 l/min e Ar+8%CO₂ como gás externo a 12 l/min.

Para cada combinação de corrente, a velocidade de alimentação do arame foi ajustada de modo a manter o comprimento do arco em torno de 7 mm (suficiente para possibilitar a rotação do arco e ainda permanecer fora da tocha). Paralelamente, a velocidade de soldagem também era ajustada para manter uma relação *Velocidade de Soldagem/Velocidade de Alimentação* constante e igual a $1,8 \times 10^{-2}$, o que produz cordões de solda com o mesmo volume e evita variações no comprimento energizado do eletrodo consumível (se a poça de fusão ficar demasiadamente volumosa, o comprimento energizado do eletrodo tende a diminuir para um mesmo comprimento de arco).

Os experimentos foram realizados em duas etapas. Na primeira, foi determinada a faixa de corrente de transição goticular axial e goticular rotacional (as condições dos testes realizados estão apresentadas na Tabela 7.1). Para estes experimentos foi utilizada a filmagem em alta velocidade pela técnica perfilografia, já apresentada no Capítulo 5. Na

segunda etapa, foi avaliada a geometria do cordão de solda e rendimento de deposição (as condições dos testes realizados estão apresentadas na Tabela 7.2).

Tabela 7.1 – Condições de soldagem utilizadas na determinação da faixa de corrente de transição goticular axial e goticular rotacional

Teste	Corrente no arco Externo [A]	Corrente no arco interno [A]	Velocidade de Alimentação [m/min]	Velocidade de Soldagem [cm/min]
1	100	340	16,2	29
2	100	360	17,4	31
3	100	380	18,9	34
4	0	360	15,0	27
5	0	380	16,3	29
6	0	400	17,3	31

Tabela 7.2 – Condições de soldagem utilizadas para avaliar a geometria do cordão de solda e rendimento de deposição

Teste	Corrente no arco Externo [A]	Corrente no arco interno [A]	Velocidade de Alimentação [m/min]	Velocidade de Soldagem [cm/min]
7	100	340	16,2	37
8	100	370	17,6	40
9	100	380	18,9	43
10	0	340	14,0	32
11	0	370	15,5	36
12	0	400	17,3	40

Para o cálculo do rendimento de deposição, foram considerados os pesos das chapas de teste antes (M_i) e após a soldagem (M_f) e o tempo de arco aberto (T_{ab}), que permitiram o cálculo da taxa de deposição de material sobre a chapa (T_d) através da Equação 7.1 :

$$T_d = \frac{(M_f - M_i)}{T_{ab}} \quad [\text{g/min}] \quad (\text{Equação 7.1})$$

A taxa de fusão do arame (T_F) foi determinada pela Equação 7.2:

$$T_F = \left(\frac{\pi \cdot d^2}{4} \right) \cdot V_{alim} \cdot \rho \quad [\text{g/min}] \quad (\text{Equação 7.2})$$

onde d é o diâmetro do eletrodo, V_{alim} a velocidade de alimentação do arame e ρ a massa específica do arame (através de pesagens em balança de alta resolução e medições do diâmetro do arame com o micrometro, encontrou-se uma massa específica de 7,6 g/cm³).

Finalmente, a relação entre a taxa de deposição (T_d) e a taxa de fusão do arame (T_f) corresponde ao rendimento de deposição foi determinada conforme Equação 7.3.

$$n_d = \frac{T_d}{T_f} \quad [\%] \quad (\text{Equação 7.3})$$

7.3 Resultados e Discussão

Na Tabela 7.3 estão apresentados os valores médios, com seus respectivos desvios padrões, dos sinais de corrente e tensão monitorados para os circuitos do arco interno e do arco externo, para cada um dos experimentos apresentados na Tabela 7.1. Esses testes foram filmados com duas condições de filtros, uma priorizando a visualização da transferência metálica e uma priorizando a visualização do arco. Os resultados da filmagem da transferência metálica no processo "Plasma-MIG" com Arcos Concêntricos são mostrados nas Figuras 7.5, 7.7 e 7.9 e para a filmagem do arco nas Figuras 7.6, 7.8 e 7.10. Para o processo MIG/MAG convencional, a transferência metálica é mostrada nas Figuras 7.11, 7.13 e 7.15, e a filmagem do arco nas Figuras 7.12, 7.14 e 7.16.

Tabela 7.3 - Valores médios dos sinais de corrente e tensão monitorados para os circuitos dos arcos externo e interno

Teste	$I_{ArcoExterno}$ [A]	$U_{ArcoExterno}$ [V]	$I_{ArcoInterno}$ [A]	$U_{ArcoInterno}$ [V]
1	98,7 ^{±2,9}	42,2 ^{±1,9}	341,1 ^{±4,3}	32,5 ^{±1,8}
2	98,9 ^{±3,2}	41,0 ^{±2,5}	360,7 ^{±4,1}	32,7 ^{±1,9}
3	98,7 ^{±3,0}	39,5 ^{±1,9}	379,2 ^{±4,7}	33,2 ^{±1,8}
4	-	-	359,8 ^{±4,9}	34,2 ^{±1,9}
5	-	-	380,4 ^{±4,4}	33,7 ^{±2,4}
6	-	-	398,8 ^{±4,6}	35,6 ^{±2,2}

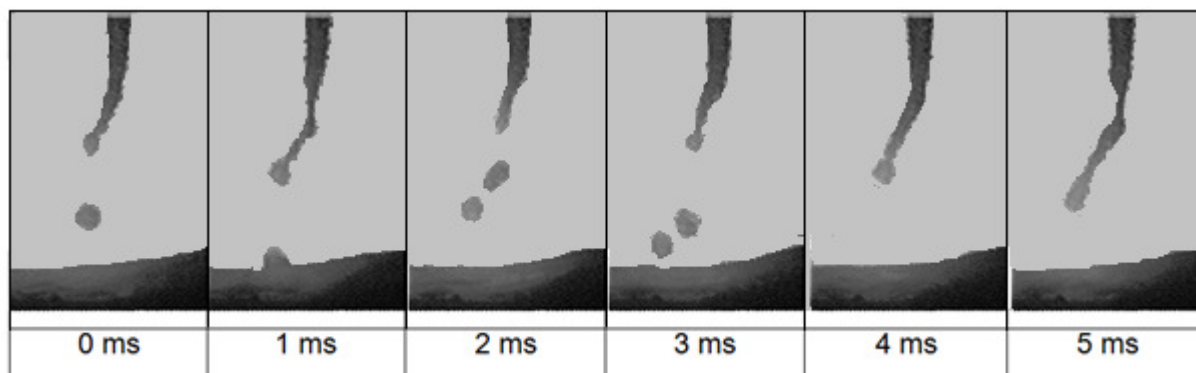


Figura 7.5 - Visualização da transferência metálica para corrente no eletrodo de 340 A e corrente no arco externo de 100 A (Teste 1)

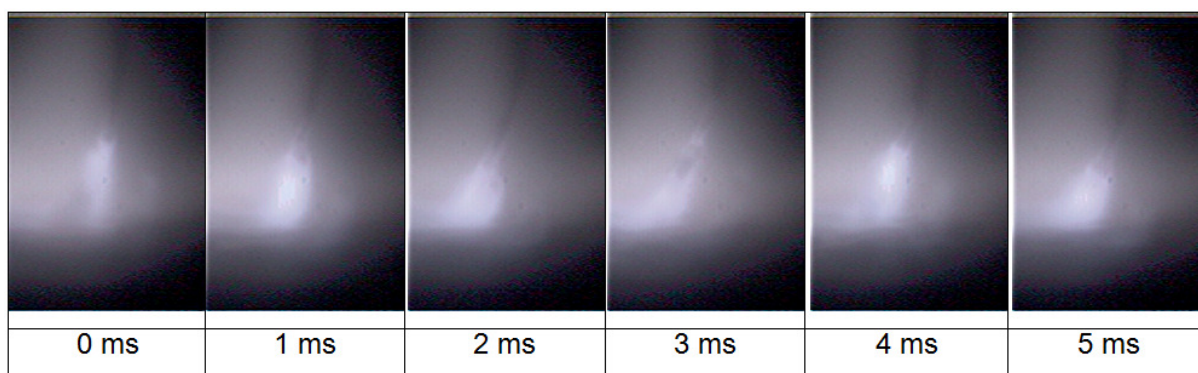


Figura 7.6 - Visualização dos arcos para corrente no eletrodo de 340 A e corrente no arco externo de 100 A (Teste 1)

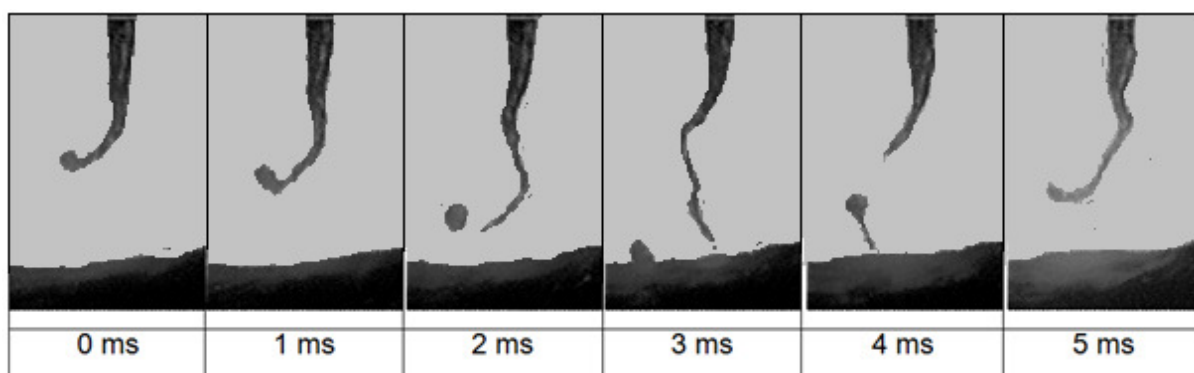


Figura 7.7 - Visualização da transferência metálica para corrente no eletrodo de 360 A e corrente no arco externo de 100 A (Teste 2)

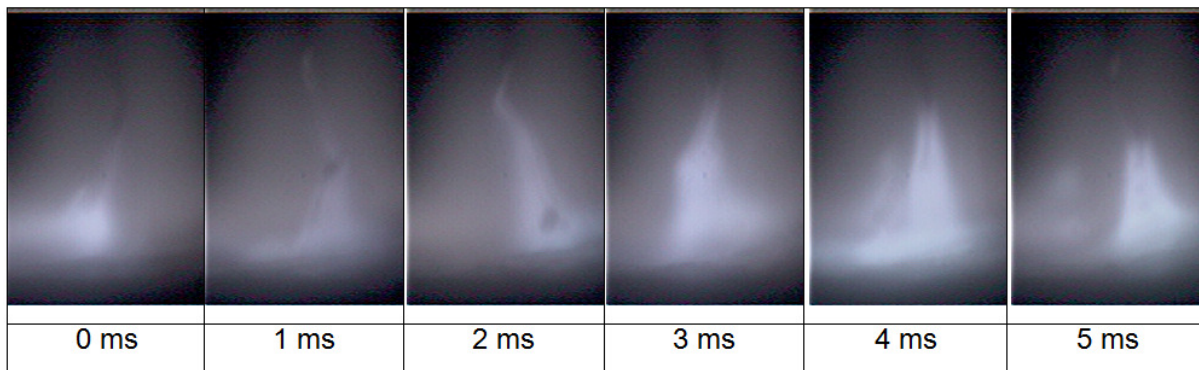


Figura 7.8 - Visualização dos arcos para corrente no eletrodo de 360 A e corrente no arco externo de 100 A (Teste 2)

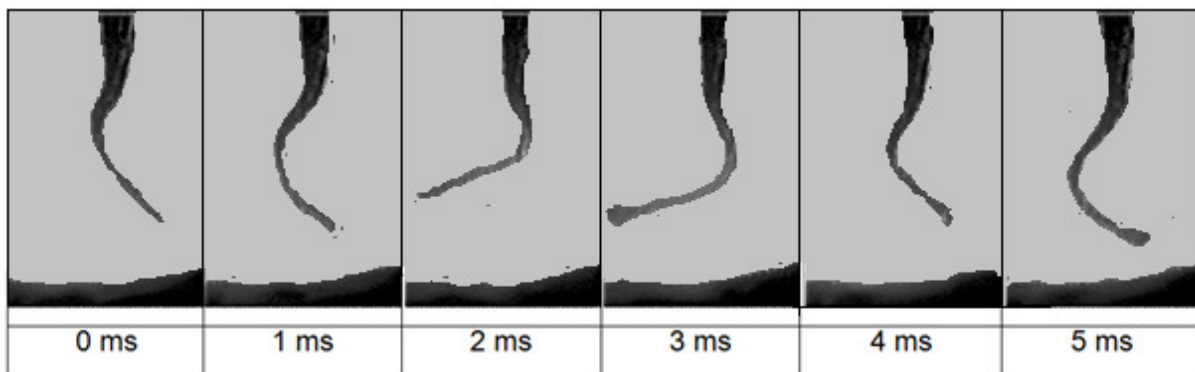


Figura 7.9 - Visualização da transferência metálica para corrente no eletrodo de 380 A e corrente no arco externo de 100 A (Teste 3)

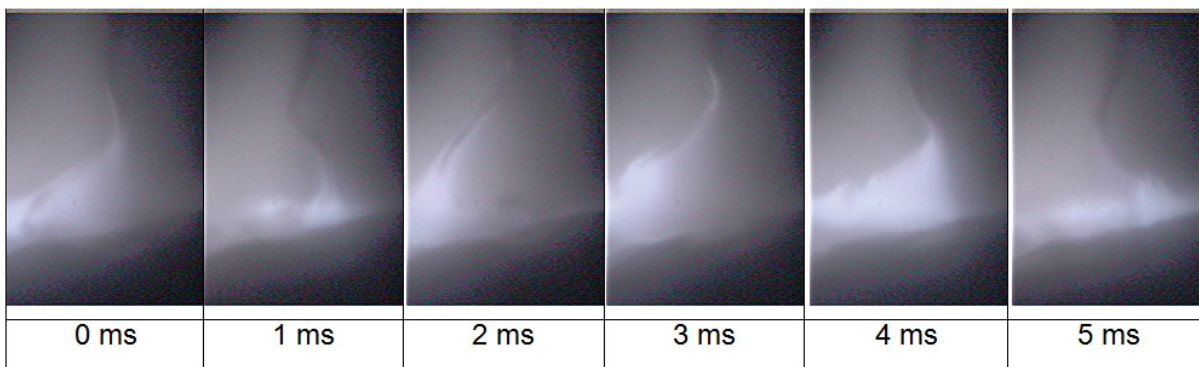


Figura 7.10 - Visualização dos arcos para corrente no eletrodo de 380 A e corrente no arco externo de 100 A (Teste 3)

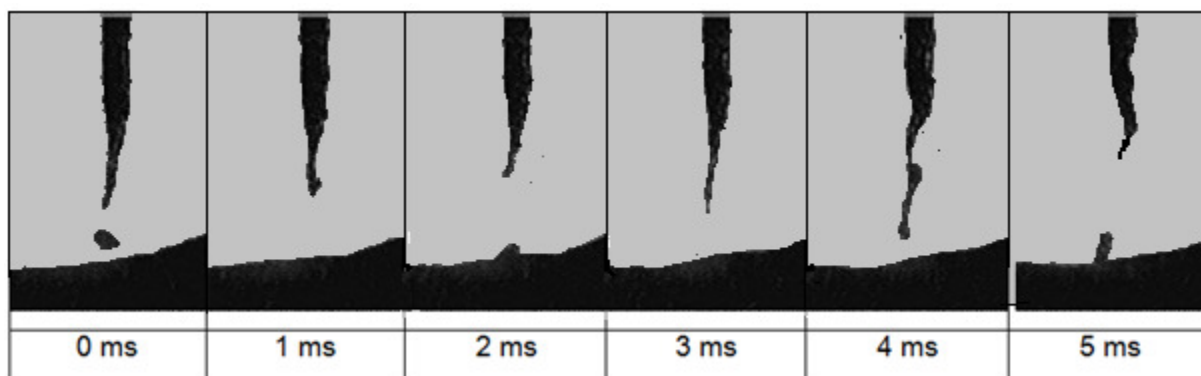


Figura 7.11 - Visualização da transferência metálica para corrente no eletrodo de 360 A sem corrente no arco externo (Teste 4)

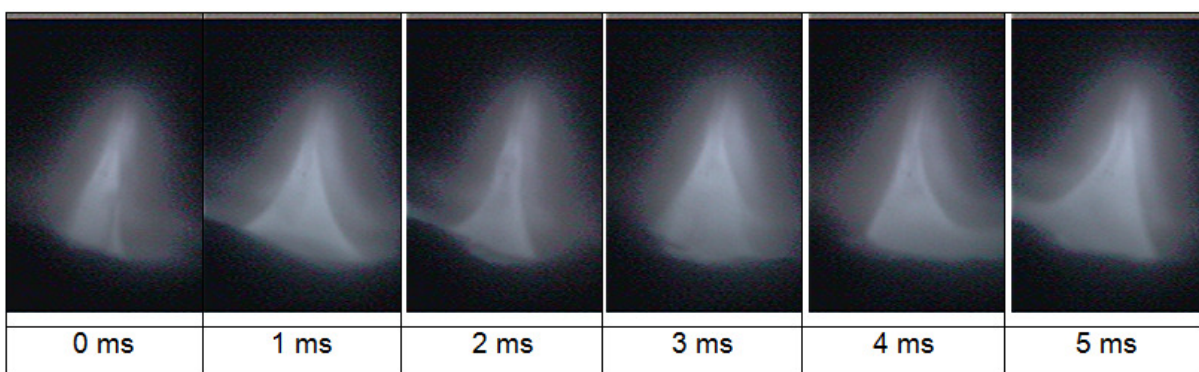


Figura 7.12 - Visualização do arco para corrente no eletrodo de 360 A sem corrente no arco externo (Teste 4)

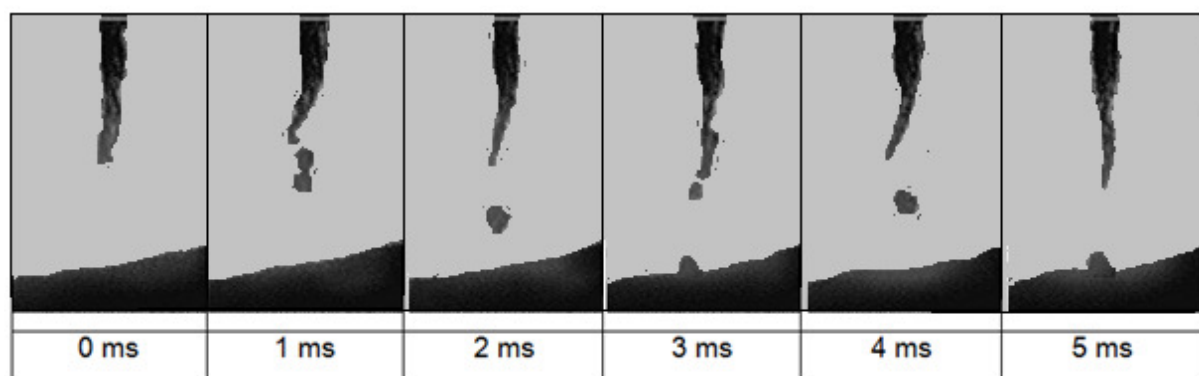


Figura 7.13 - Visualização da transferência metálica para corrente no eletrodo de 380 A sem corrente no arco externo (Teste 5)

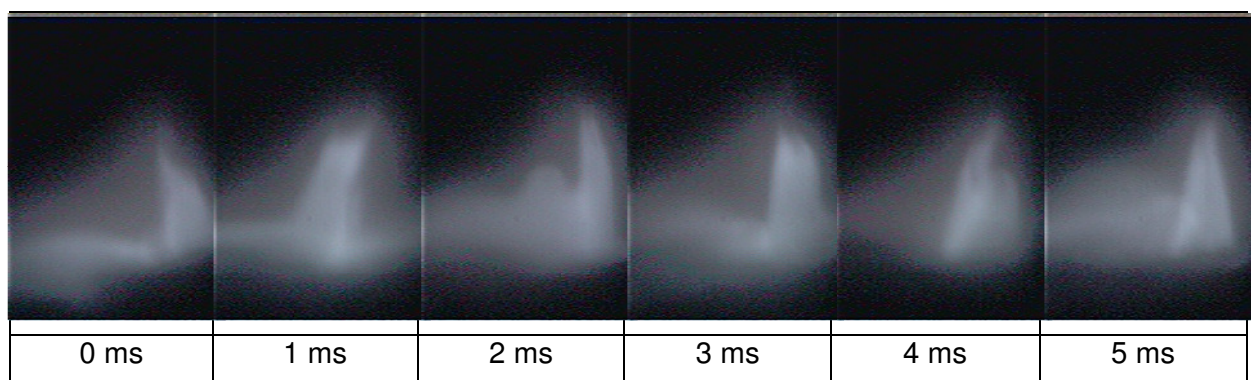


Figura 7.14 - Visualização do arco para corrente no eletrodo de 380 A sem corrente no arco externo (Teste 5)

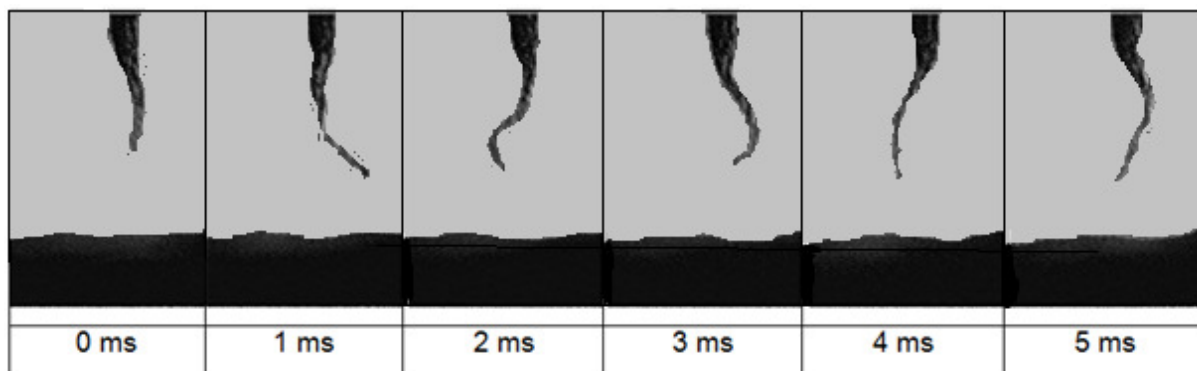


Figura 7.15 - Visualização da transferência metálica para corrente no eletrodo de 400 A sem corrente no arco externo (Teste 6)

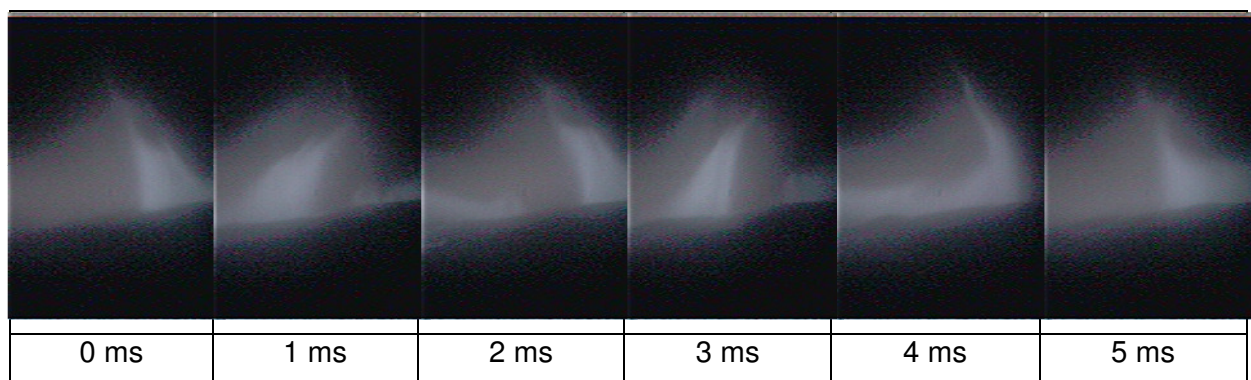


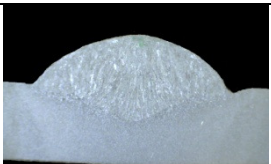
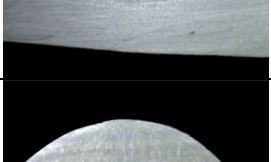
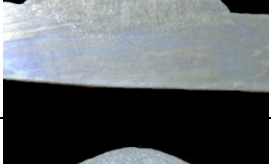
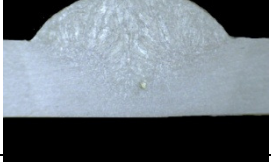
Figura 7.16 - Visualização do arco para corrente no eletrodo de 400 A sem corrente no arco externo (Teste 6)

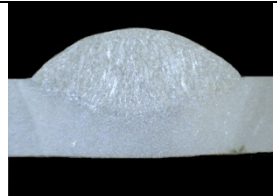
A partir da observação dessas imagens, pode se dizer que, para o processo "Plasma-MIG" com Arcos Concêntricos e combinação arame-gases, a transferência rotacional é conseguida a partir de 360 A no arco interno, ao passo que para o processo MIG/MAG convencional foi necessário 400 A de corrente. Este resultado está de acordo

com o observado por Essers et al. (1972), que conseguiu a transferência rotacional com menores valores de corrente passando pelo arame quando utilizava o arco externo no processo MIG/MAG.

Na Tabela 7.4 estão apresentados os parâmetros geométricos do cordão de solda, bem como a sua diluição no metal de base, rendimento de deposição e imagens das seções transversais dos corpos de prova características para cada condição de soldagem.

Tabela 7.4 – Parâmetros geométricos do cordão, diluição no metal de base, rendimento de deposição e imagens das seções transversais dos corpos de prova

Teste	Largura [mm]	Reforço [mm]	Penetração [mm]	Área Fundida [mm ²]	Diluição [%]	Rendimento de Deposição [%]	Seção transversal do corpo de prova (metal de base com 6,35 mm de espessura)
7	16,4 ^{±0,2}	4,1 ^{±0,1}	3,0 ^{±0,2}	23,7 ^{±0,7}	50,9	96,02	
8	16,5 ^{±0,1}	4,2 ^{±0,1}	2,9 ^{±0,5}	24,2 ^{±1,8}	52,2	96,85	
9	17,3 ^{±0,1}	4,0 ^{±0,1}	2,4 ^{±0,1}	25,5 ^{±1,6}	54,9	96,36	
10	16,0 ^{±0,2}	4,4 ^{±0,1}	4,5 ^{±0,5}	29,5 ^{±4,2}	63,4	97,66	
11	16,2 ^{±0,1}	4,6 ^{±0,1}	4,1 ^{±0,4}	31,7 ^{±2,3}	68,2	96,56	

Teste	Largura [mm]	Reforço [mm]	Penetra- ção [mm]	Área Fundida [mm ²]	Diluição [%]	Rendi- mento de Deposição [%]	Seção transversal do corpo de prova (metal de base com 6,35 mm de espessura)
12	17,3 ^{±0,1}	4,0 ^{±0,1}	3,2 ^{±0,4}	37,0 ^{±3,5}	79,6	96,52	

A partir da Tabela 7.4, não foi observada nenhuma diferença significativa com relação ao rendimento de deposição e com valores próximos a 100%, o que mostra, para os parâmetros avaliados, que ambos os processos, operaram em uma faixa de transferência estável e com baixa geração de respingos. Essers et al. (1972) observaram que a transferência rotacional com o processo MIG/MAG na presença do arco externo acontecia de forma estável e sem a geração de respingos (Figura 7.3), em uma ampla faixa operacional. Para o processo MIG/MAG, conseguiram soldar com uma baixa quantidade de respingos numa estreita faixa operacional (Figura 7.2). No presente trabalho, não foi possível verificar qualquer variação considerável nos valores mostrados na Tabela 7.4. Vale ressaltar que os valores aqui apresentados correspondem a uma estreita faixa de corrente acima da transição (testes limitados em função da capacidade do alimentador de arame), demandando estudos adicionais em uma faixa mais ampla, onde possivelmente o processo "Plasma-MIG" com Arcos Concêntricos apresente maiores resultados.

Ainda na Tabela 7.4, nas condições avaliadas, o processo MIG/MAG convencional apresentou uma diluição média de 70% (testes 10,11 e 12) enquanto o "Plasma-MIG" com Arcos Concêntricos apresentou uma diluição média de 53% (testes 7, 8 e 9). Esta redução deve estar relacionada aos mesmos mecanismos que resultaram na redução da penetração e área fundida para algumas condições apresentadas no Capítulo 6.

Os parâmetros geométricos mostrados na Tabela 7.4 são apresentados de forma gráfica nas Figuras 7.17 e 7.18 para facilitar a visualização. A Figura 7.17(a) mostra que a largura aumenta consideravelmente quando o modo de transferência metálica assume o modo goticular rotacional. Isso acontece devido ao fato de que neste modo de transferência as gotas atingem a poça de fusão de forma menos concentrada, sendo depositadas em uma maior área superficial da chapa, o que favorece cordões mais largos. Mas observa-se, sobretudo uma tendência do processo "Plasma-MIG" com Arcos Concêntricos produzirem

cordões mais largos. A Figura 7.17(b), por sua vez, mostra que o reforço apresenta comportamento inverso ao da largura, uma vez que todas as soldas foram realizadas com um mesmo volume de material depositado (mesma relação entre velocidade de soldagem e velocidade de alimentação de arame).

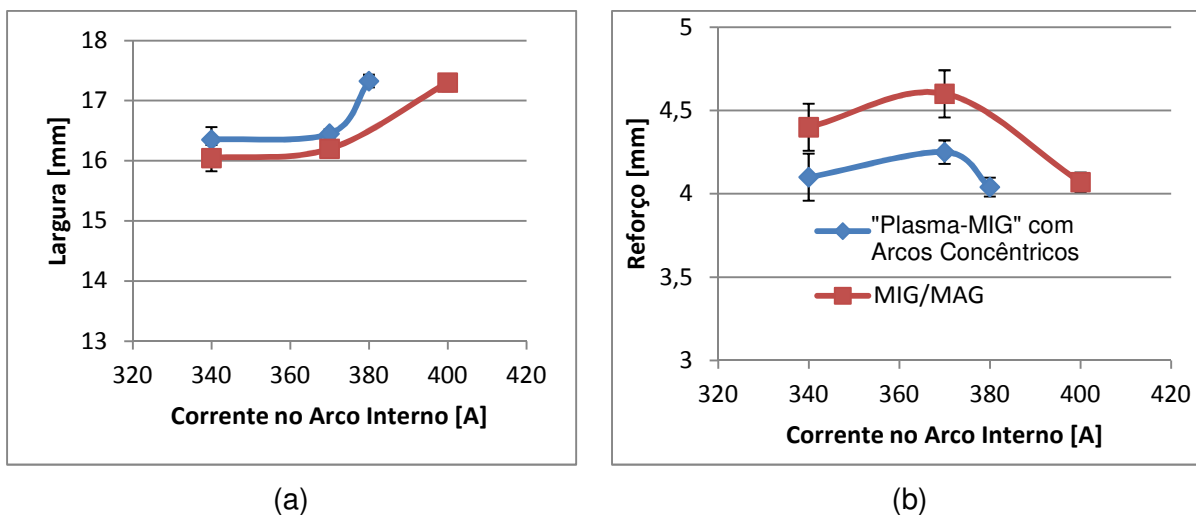


Figura 7.17 – (a) Largura e (b) Reforço do cordão de solda em função da corrente no arco interno para o processo MIG/MAG convencional e "Plasma-MIG" com Arcos Concêntricos com 100 A de corrente no arco externo

Na Figura 7.18(a), é observada uma redução na penetração do cordão de solda no metal de base à medida que se muda o modo de transferência para goticular rotacional. Isso acontece devido às gotas atingirem a chapa de forma não concentrada, o que dificulta a penetração do cordão (menor efeito do momentum da gota). Essers et al. (1972) acrescenta que a densidade de energia no modo rotacional é menor, favorecendo a formação de cordões de menor penetração. Mas deve-se destacar que a penetração é significativamente menor para o "Plasma-MIG" com arcos concêntricos, devido ao efeito da corrente externa, como também já verificado para algumas condições mostradas no Capítulo 6. Já pela Figura 7.18(b), era de se esperar para a área fundida um comportamento similar ao da penetração. No entanto, a área fundida aumenta no modo rotacional. Esse resultado pode ser entendido ao observar as imagens das seções transversais mostradas na Tabela 7.4, que mostra que no modo goticular os cordões apresentam um formato do tipo "cálice" que favorece a penetração, ao passo que no modo rotacional os cordões apresentam um formato tipo "prato fundo" que favorece a área fundida.

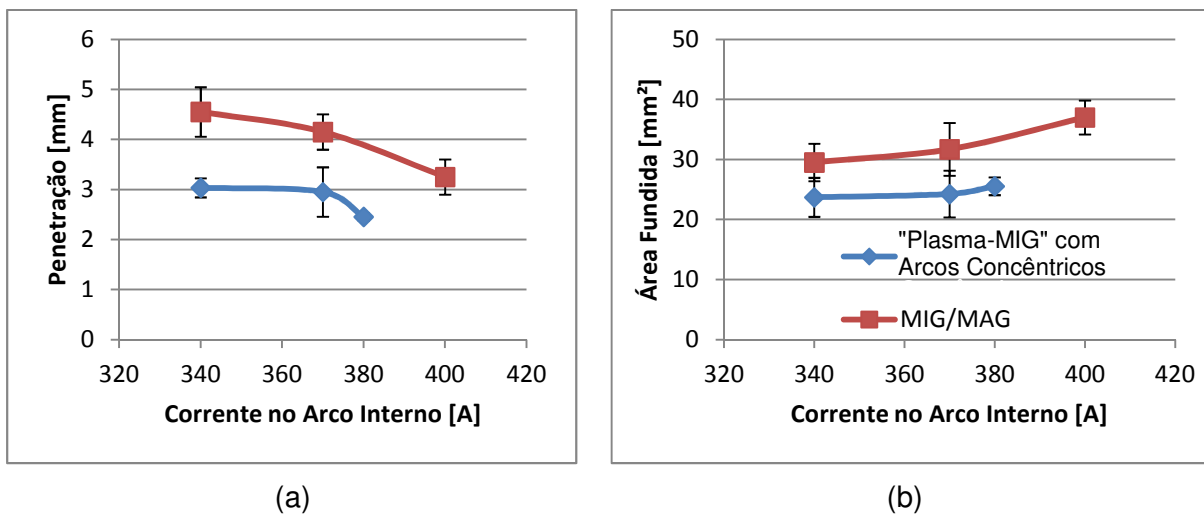


Figura 7.18 – (a) Penetração e (b) Área Fundida do cordão de solda em função da corrente no arco interno para o processo MIG/MAG convencional e "Plasma-MIG" com Arcos Concêntricos com 100 A de corrente no arco externo

7.4 Conclusões do Capítulo

Para as condições e parâmetros de soldagem utilizados neste trabalho, pode-se concluir que:

- A presença do arco externo reduz o valor da corrente de transição entre os modos goticlar axial e goticlar rotacional;
- Ao passar para o modo goticlar rotacional, a largura do cordão de solda aumenta e o reforço diminui consideravelmente, tanto para o processo MIG/MAG convencional quanto para o "Plasma-MIG" com Arcos Concêntricos, mas a largura é maior e o reforço menor para o processo "Plasma-MIG" com Arcos Concêntricos;
- Ao passar para o modo goticlar rotacional, a penetração do cordão de solda diminui para ambos os processos, mas a penetração é menor para o processo "Plasma-MIG" com Arcos Concêntricos;
- A soldagem na faixa de transição goticlar axial e goticlar rotacional resultou em cordões de solda com menor diluição para o processo "Plasma-MIG" com Arcos Concêntricos.

CAPÍTULO VIII

INVESTIGAÇÃO SOBRE O CAMINHO PERCORRIDO PELA CORRENTE PROVENIENTE DO ARCO EXTERNO

8.1 Introdução

Durante a realização dos experimentos descritos nos capítulos anteriores, foi observado que a presença do arco externo contribui na taxa de fusão do eletrodo consumível. No Capítulo 5, em especial, foi observada uma contribuição significativa do arco externo na fusão do eletrodo, contribuição esta que era mais acentuada para uma corrente mínima no arco externo (35 A) e menos evidente para os demais incrementos de corrente no arco externo. Estes resultados coincidiam com a tendência já observada anteriormente por Oliveira (2006) e Resende (2009), que afirmaram que o incremento na taxa de fusão do eletrodo depende da sua capacidade em absorver a energia disponibilizada pelo arco externo. Esta absorção depende, por sua vez, dos mecanismos de transferência de calor (condução, convecção e radiação).

No entanto, existe uma hipótese adicional, a de que o aumento da taxa de fusão do eletrodo poderia ser em função da passagem da corrente proveniente do arco externo pelo eletrodo consumível. Se isso acontecer, o ganho na taxa de fusão seria também em função do aquecimento por efeito joule e não apenas pelos mecanismos de troca de calor.

Esta hipótese se fundamenta no fato de que o eletrodo consumível poderia assumir o papel de um "caminho mais fácil" para a passagem dos elétrons. Caso a corrente proveniente do arco externo, ou parte dela, passe pelo eletrodo consumível, um arco será formado entre a chapa e a ponta do eletrodo consumível, sem a necessidade de uma fonte conectada a este eletrodo. Desta forma, o objetivo deste capítulo foi o de realizar uma tentativa de visualizar um arco, entre a chapa e a ponta do eletrodo consumível, o que confirmaria a hipótese.

8.2 Metodologia

Com o objetivo de visualizar o caminho do arco externo, foi aproveitada uma montagem experimental de um outro trabalho (Rossi, 2011), adaptando-se um eletrodo de tungstênio puro (2,4 mm de diâmetro) em substituição ao eletrodo consumível na tocha para soldagem "Plasma-MIG" com Arcos Concêntricos, como esquematizado na Figura 8.1. O eletrodo consumível foi substituído para eliminar a transferência metálica do processo, que poderia dificultar a visualização. Do ponto de vista metodológico, a ideia foi a de gravar com filmadora de alta velocidade, regulada para 500 qps, shutter de 1/50000, sem iluminação de fundo, com filtro neutro de densidade óptica 2.5 para o arco de 40A, 3.0 para 70 A e 4.5 para o arco de 140A, o comportamento do arco externo sob diferentes valores de corrente e distância do eletrodo de tungstênio à peça, sem corrente imposta no eletrodo de W pela fonte responsável pelo arco interno. Espera-se que, caso a corrente externa encontre como caminho preferencial o eletrodo (linha tracejada na Figura 8.1) e não a própria coluna de plasma (linha pontilhada na Figura 8.1), a "fuga" de corrente possa ser identificada.

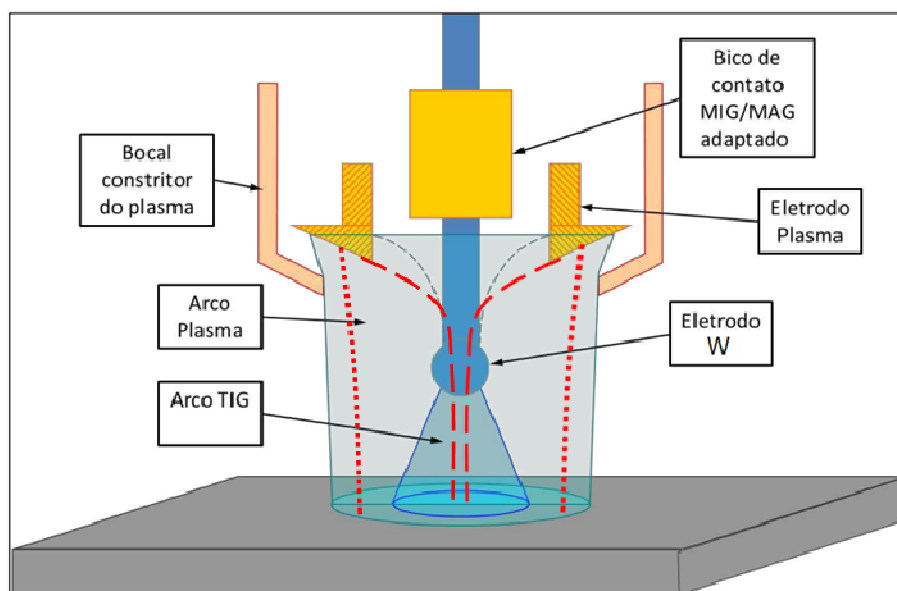


Figura 8.1 – Adaptação de um eletrodo de tungstênio em substituição ao eletrodo consumível em uma tocha para soldagem "Plasma-MIG" com Arcos Concêntricos com destaque aos possíveis caminhos percorridos pela corrente do arco externo, pontilhado, quando exclusivamente pelo arco externo, e tracejado, quando percorre também o eletrodo de W (adaptado de ROSSI, 2011)

Foram realizados experimentos apenas com a fonte responsável pelo arco externo ligada polaridade positiva (CC+) e com característica estática corrente constante. A DTP foi

fixada em 12 mm. Foi utilizado o Argônio para todos os gases, sendo o interno com vazão de 2 l/min, o intermediário com 8 l/min e o externo com 10 l/min. O arco foi aceso sobre uma chapa de 12,7 mm de espessura, 50,8 mm de largura e 200 mm de comprimento. Devido aos baixos valores de corrente utilizados, a tocha permaneceu parada sem ocasionar fusão no metal de base.

Como não é utilizado o eletrodo consumível, não foi possível utilizar o procedimento “*soft start*” conforme descrito no Capítulo 2, sendo necessário propor uma nova sequência de abertura do arco externo. Conforme ilustrado na Figura 8.2, na chapa de testes foi realizado um furo que era posicionado abaixo do eletrodo de cobre. Através do furo, foi introduzido um eletrodo auxiliar de tungstênio, até que o mesmo tocasse o eletrodo de cobre e a partir de um curto circuito, um arco era formado entre o eletrodo de cobre e o eletrodo auxiliar de tungstênio. O eletrodo auxiliar de tungstênio era então afastado da tocha e acompanhado pelo arco, até o momento em que o arco era estabelecido entre o eletrodo de cobre e a peça. Neste momento, a tocha era ligeiramente deslocada para evitar possíveis interferências do furo sobre o comportamento do arco.

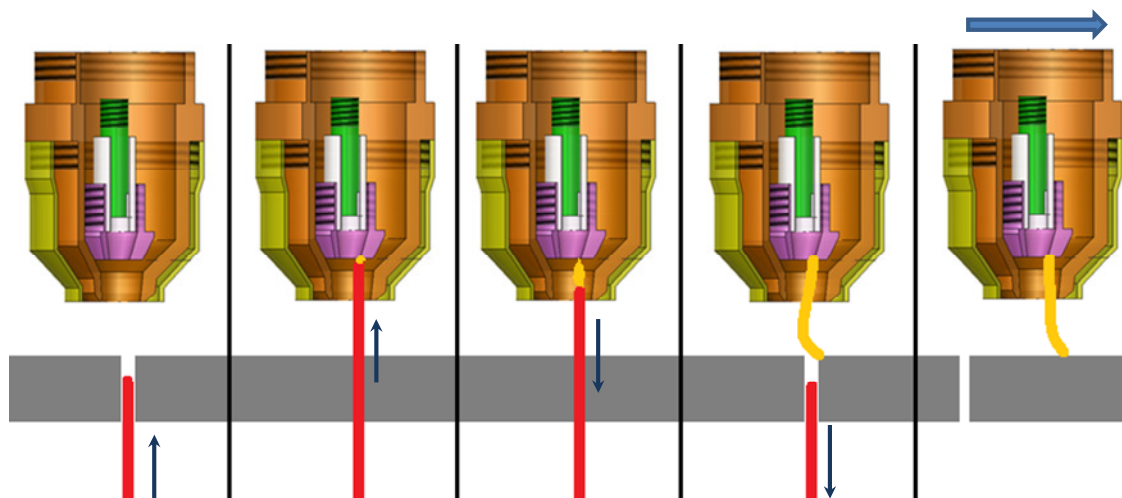


Figura 8.1 – Esquema de abertura do arco

8.3 Resultados e Discussão

Na figura 8.3 são apresentados os resultados para uma das condições avaliadas e como não se observou fenômenos transientes durante as filmagens, para os demais testes optou-se por apresentar apenas uma imagem ilustrativa do teste, conforme a Tabela 8.1. Nestas imagens, é observado o arco lateralmente em relação ao eletrodo de tungstênio, o que se repetiu para todos os testes. A posição de formação do arco coincidia com a região

onde o eletrodo auxiliar de tungstênio tocava o eletrodo de cobre no momento da abertura do arco.

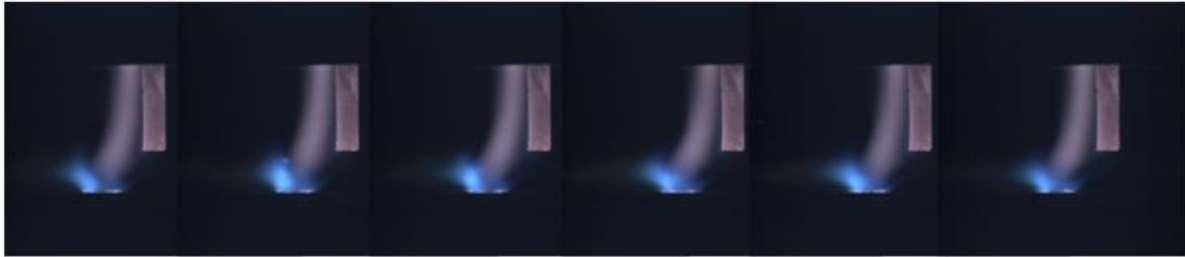
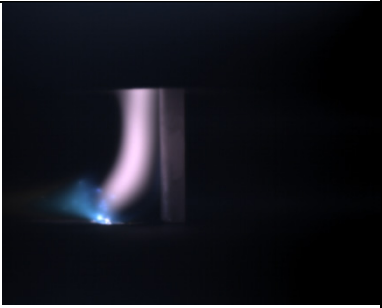
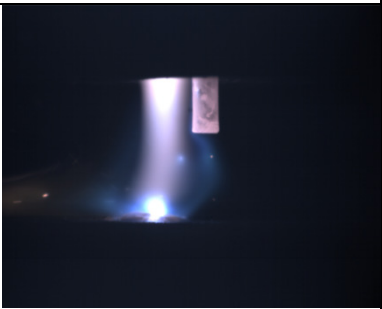


Figura 8.3 – Sequência de imagens com intervalos de 6 milissegundos para uma corrente do arco externo de 40 A e distância do eletrodo de tungstênio a peça de 8 mm

Tabela 8.1 – Imagens do arco externo em função da corrente e distância entre o eletrodo de tungstênio e a peça

Teste	Corrente [A]	Distância entre o eletrodo de tungstênio e a peça [mm]	Imagem do arco Externo
1	40	6	
2	40	4	
3	40	2	

Teste	Corrente [A]	Distância entre o eletrodo de tungstênio e a peça [mm]	Imagem do arco Externo
4	40	0	
5	70	5,5	
6	140	4	

Na Tabela 8.1, pode ser observado que, para os testes 1 a 4 (redução progressiva da distância da ponta do eletrodo de W à peça), o arco visualizado é formado em um ponto dentro da tocha (eletrodo de cobre) e a chapa, o que indica que a corrente percorre preferencialmente um caminho fora do eletrodo de tungstênio. Por estes experimentos, a contribuição do arco externo sobre o aquecimento do eletrodo interno se deve prioritariamente aos mecanismos de transferência de calor.

Considerando agora os testes 5 e 6, realizados, respectivamente, com 70 e 140 A de corrente, e com a distância da ponta do eletrodo de W à peça de 5,5 e 4 mm, respectivamente, é possível visualizar uma região de tonalidade azul que pode indicar a formação de um arco entre a ponta do eletrodo de W e a peça. No entanto, se existir, este arco é de baixa intensidade. Também deve ser considerado que esta região com tonalidade diferente pode ter acontecido com 40 A, mas devido à utilização de filtros de densidade

neutra diferente (necessários em função da diferença de brilho entre os arcos), a visualização pode ter sido prejudicada.

Mesmo não sendo possível confirmar ou descartar a hipótese de que parte da corrente passa pelo eletrodo de tungstênio e, conseqüentemente, também passaria pelo eletrodo consumível, alguns apontamentos podem ser feitos:

1ª) Considerando que exista um arco formado entre o eletrodo de tungstênio e a peça, este possui intensidade bastante inferior ao formado entre o eletrodo de cobre e a peça (arco externo), indicando que a maior parte da corrente percorre o arco externo.

2ª) Com base nos valores da resistividade (ρ) de $5,6 \times 10^{-8}$ e $9,71 \times 10^{-8}$ [$\Omega \cdot m$] e do coeficiente de temperatura (α) de 0,0045 e 0,0065 [$1/^\circ C$], respectivamente para o Tungstênio e o Ferro (principal constituinte do aço) encontrados no site Hyperphysics (2013), foram estimadas e plotadas a variação da resistividade em função da temperatura, conforme Figura 8.4. Acima da temperatura ambiente, a resistividade do ferro é maior que a do tungstênio. Como a resistividade do tungstênio é menor que a do ferro (principal constituinte do eletrodo consumível), seria mais fácil a passagem da corrente elétrica pelo mesmo. No entanto, se aconteceu, não foi evidente pelas filmagens.

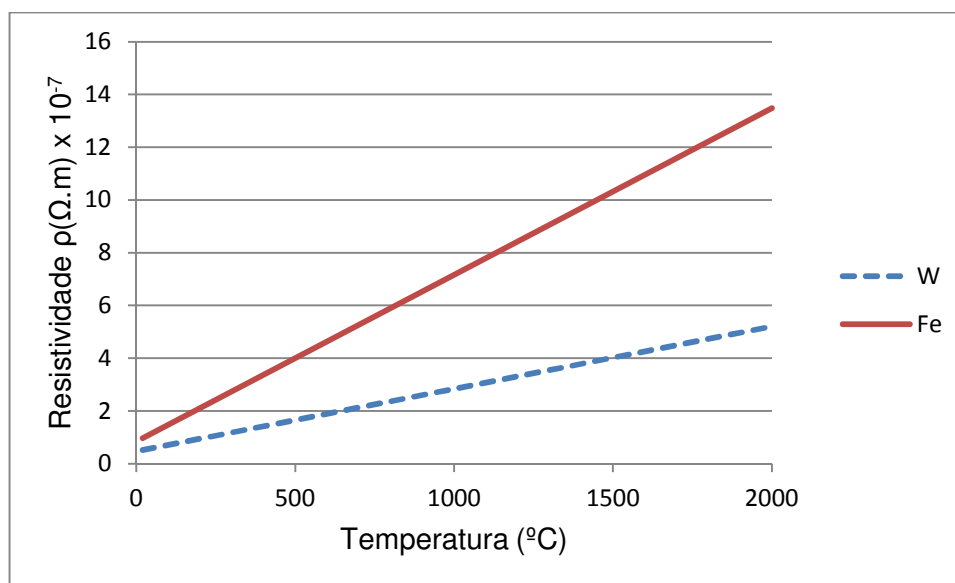


Figura 8.4 – Variação da resistividade em função da temperatura

3ª) O teste 4, referente a soldagem com 40 A de corrente no arco externo, a princípio, seria um caminho mais fácil para a passagem da corrente, uma vez que o eletrodo toca a peça e faz deste um caminho de menor resistência. No entanto, não foi suficiente para ser parte do caminho de toda a corrente, e, caso parte da corrente tenha utilizado o caminho do eletrodo, um arco entre o eletrodo de tungstênio e o eletrodo de cobre deve ter sido formado, que por sua vez, não seria visível já que aconteceria dentro da tocha.

4ª) A formação de um arco entre a peça e o eletrodo de tungstênio, implica obrigatoriamente na formação de um segundo arco, entre o eletrodo de tungstênio e o eletrodo de cobre, o que seria dificultado, uma vez que o eletrodo de tungstênio não teria óxidos suficientes para uma sequência contínua de emissão de elétrons a frio (emissão por campo). Por esse motivo, talvez a utilização do tungstênio não tenha sido uma boa alternativa, uma vez que na situação com alimentação contínua de eletrodo consumível de aço sempre existirá uma camada de óxido disponível para emissão de elétrons.

8.4 Considerações do Capítulo

Para as condições e parâmetros utilizados neste trabalho, pode-se concluir que a montagem experimental proposta não foi suficiente para confirmar ou descartar a hipótese de que uma parcela da corrente escolhe o eletrodo responsável pelo arco interno como sua trajetória.

Considerando que a questão não foi solucionada, ainda são necessárias futuras abordagens para confirmar ou descartar a hipótese de que parte da corrente usa o eletrodo do arco interno como parte do caminho. Como proposta, sugere utilizar um eletrodo consumível com diâmetro maior (por exemplo, 2,4 mm), que resultaria em uma baixa taxa de fusão. Se parte da corrente utilizar o eletrodo consumível como caminho, necessariamente ocorrerá uma limpeza catódica na superfície do eletrodo em função da "emissão por campo". No caso desta limpeza ser visualizada, após a finalização de uma solda, a passagem da corrente pelo eletrodo consumível seria comprovada.

CAPÍTULO IX

CONCLUSÕES

Considerando a lista de objetivos específicos, apresentada no Capítulo 1, e as condições experimentais avaliadas, pode se concluir por este trabalho que:

9.1 Quanto à relação entre as vazões dos três gases (externo, intermediário e interno) utilizados no processo e o acabamento (aspecto superficial) do cordão de solda:

- ✓ Nas faixas de vazão estudadas (5 a 10, 2 a 8 e 2 a 8 l/min, respectivamente para os gases externo, intermediário e interno), os melhores cordões de solda são obtidos quando se utiliza maior vazão para os gases Externo e Intermediário e menor vazão para o gás Interno;
- ✓ O gás intermediário é o que mais exerce influência sobre o acabamento do cordão de solda;
- ✓ Os cordões resultantes da soldagem com baixa vazão de gás interno (2 l/min) e sem a utilização deste gás (0 l/min) apresentaram resultados semelhantes, dando ao usuário a possibilidade de soldar sem a presença deste gás, sob a demanda de mais estudos para verificar se a durabilidade dos componentes não ficaria prejudicada.

9.2 Quanto ao efeito da combinação de gases (Ar ou Ar+8%CO₂ para todos os gases ou Ar para os gases intermediário e interno e Ar+8%CO₂ para o gás externo) sobre o desgaste nos componentes da tocha de soldagem:

- ✓ A utilização da mistura ativa (Ar+8%CO₂) promove uma deterioração mais acelerada dos componentes da tocha;

- ✓ É necessária a limpeza dos componentes da tocha, independente da combinação de gases, sendo que em intervalos mais curtos quando se utiliza Ar+8%CO₂ para todos os gases e em intervalos mais longos quando utiliza Ar para os gases intermediário e interno e Ar+8%CO₂ para o gás externo;
- ✓ Quanto maior a proporção de CO₂ nos gases utilizados no processo, mais acelerado o desgaste dos componentes da tocha.

9.3 Quanto à transição entre os modos de transferência globular e goticular axial para diferentes valores de corrente no arco externo mostrou que:

- ✓ A presença do arco externo aumenta a corrente que é necessária no eletrodo consumível para atingir a transição entre o modo globular e goticular axial;
- ✓ Com o arco externo, o diâmetro das gotas de metal transferidas são maiores, para uma mesma corrente de soldagem passando pelo eletrodo consumível;

9.4 Quanto aos parâmetros cinemáticos das gotas em transferência:

- ✓ O aumento da corrente no arco interno tende a aumentar a velocidade de chegada das gotas na poça de fusão;
- ✓ A quantidade de movimento efetiva aumenta com a corrente quando está associada ao modo de transferência globular
- ✓ A quantidade de movimento efetiva diminui quando associada ao modo de transferência goticular
- ✓ Os pontos máximos (nos gráficos quantidade de movimento efetiva *versus* corrente no arco interno) para a quantidade de movimento estão relacionados à mudança no modo de transferência metálica (faixa de transição).

9.5 Quanto à influência da corrente de soldagem no arco externo sobre a geometria do cordão de solda (para um volume de cordão igual, pela manutenção da relação velocidade de alimentação e velocidade de soldagem):

- ✓ Maiores larguras, menores reforços, maiores penetrações e maiores áreas fundidas são alcançadas ao se usar maiores valores de corrente externa;
- ✓ Para a penetração e área fundida, existe um ponto de mínimo com a corrente externa (em torno de 40 A), considerando que sem corrente externa os valores da penetração e área fundida são maiores e voltam a crescer com o aumento da corrente externa

(superando o valor para quando a corrente externa inexistente) a partir do ponto de mínimo;

- ✓ A capacidade de se reduzir a área fundida, consequentemente a diluição, é um indicativo de que o processo possui potencialidades para ser aplicado em operações que exijam uma menor diluição, como por exemplo, em revestimentos.

9.6 Quanto à influência da corrente no arco interno, da distância entre a tocha e a peça e do ângulo de inclinação da tocha sobre a geometria do cordão de solda (para um volume de cordão igual, pela manutenção da relação velocidade de alimentação e velocidade de soldagem):

- ✓ Maiores larguras de cordão são também obtidas com maiores correntes no arco interno, menor distância da tocha até a peça (não é recomendado utilizar valores abaixo de 10 mm) e a tocha na condição empurrando;
- ✓ Maiores reforços de cordão são obtidas com menores correntes no arco e interno, maior distância da tocha até a peça e a tocha na condição puxando;
- ✓ Maiores penetrações são obtidas para maiores correntes no arco interno, menor distância da tocha à peça e tocha na condição puxando;
- ✓ Maiores valores para a área fundida são também obtidas para maiores valores de corrente no arco interno com menor distância entre a tocha e a peça, mas a inclinação da tocha, para as condições avaliadas, não promoveu mudança na área fundida em função da mudança do perfil do cordão de solda.

9.7 Quanto ao efeito do arco externo sobre a transição entre os modos de transferência goticular axial e goticular rotacional e, consequentemente, sobre a geometria e geração de respingos (para um volume de cordão igual, pela manutenção da relação velocidade de alimentação e velocidade de soldagem):

- ✓ Ao contrário da transição entre os modos globular e goticular axial, a presença do arco externo reduz o valor da corrente de transição entre os modos goticular axial e goticular rotacional;
- ✓ Ao passar para o modo goticular rotacional, a largura do cordão de solda aumenta e o reforço diminui consideravelmente, tanto na presença ou ausência do arco externo;
- ✓ Ao passar para o modo goticular rotacional, a penetração do cordão de solda diminui tanto na presença ou ausência do arco externo;

- ✓ A soldagem na faixa de transição goticular axial e goticular rotacional resultou em cordões de solda com menor diluição quando na presença do arco externo;
- ✓ Os rendimentos de deposição, para os parâmetros avaliados, foram similares, tanto na ausência, quanto na presença do arco externo.

9.8 Quanto ao caminho percorrido pela corrente proveniente do arco externo pode-se dizer que:

- ✓ A maior parte da corrente externa não utiliza o eletrodo responsável pelo arco interno como caminho

9.9 Considerações finais

Considerando o objetivo geral do presente trabalho, pode ser ressaltado que o mesmo constitui de uma base de informações a respeito de parâmetros operacionais do processo, que pode contribuir para tanto para o meio científico, como ponto de partida para abordagens adicionais, quanto para o meio produtivo, como base para a seleção de parâmetros.

Vale ressaltar que o processo MIG/MAG com Arco Duplo Concêntricos ainda não tem um espaço no meio produtivo, o que pode ser atribuído à dificuldade de regulação de parâmetros, bem como dos custos com equipamentos, que é superior se comparado ao processo MIG/MAG convencional. No entanto, existem características promissoras que podem fazer com que o processo, em um futuro próximo, faça parte da realidade do meio produtivo. Dentre elas podem ser citadas a maior facilidade, em relação ao MIG/MAG convencional, em produzir cordões de solda com diferentes geometrias, utilizando diferentes combinações de corrente nos circuitos interno e externo. No processo MIG/MAG com Arco Duplo Concêntricos é possível produzir cordões de solda com menores diluições, quando comparado ao processo MIG/MAG convencional com os mesmos níveis de corrente passando pelo eletrodo consumível.

CAPÍTULO X

PROPOSTAS PARA TRABALHOS FUTUROS

Como forma de complementar e avançar nos estudos referentes a este trabalho, sugerem-se os seguintes temas:

- ✓ Verificar se a soldagem sem a presença do gás interno acelera significativamente o desgaste do eletrodo anular de cobre (o gás também tem a função de retirar calor dos componentes da tocha) e se a redução de custos referentes à utilização de um gás a menos é suficiente para compensar o aumento do custo com a reposição dos eletrodos de cobre;
- ✓ Utilizar outros tipos de gases como gás intermediário e interno, como, por exemplo, H_2 , uma vez que o mesmo tem mostrado melhorar o desempenho do processo Plasma, como redução do nível de porosidade, melhoria no aspecto visual do cordão, aumento na velocidade possível de soldar sem a formação do humping;
- ✓ Avaliar o processo MIG/MAG com Arco Duplo Concêntricos operando na polaridade negativa (CC^-) nos dois arcos, utilizando eletrodo anular revestido por tungstênio (o processo MIG/MAG convencional operando na polaridade negativa tem aumento significativo na taxa de deposição, mas os cordões de solda apresentam baixa molhabilidade, podendo o arco externo agir sobre a molhabilidade do cordão);
- ✓ Determinar as resistividades das gotas e da coluna de plasma para um dado gás de proteção, a fim de melhorar o entendimento sobre o caminho percorrido pela corrente proveniente do arco externo;
- ✓ Verificar se a vazão dos gases, principalmente o intermediário, é capaz de alterar a geometria do cordão de solda, não verificado neste trabalho, mas de extrema importância para a aplicação do processo MIG/MAG com Arco Duplo Concêntricos;

- ✓ Estudar a aplicabilidade do processo MIG/MAG com Arco Duplo Concêntricos em operação de revestimento ou soldagem de tubulação em operação, uma vez que há um potencial para redução da diluição e aumento da largura ao se usar uma corrente externa adequada;
- ✓ Estudar a estabilidade do processo com valores de corrente do arco interno bem acima da corrente de transição goticular axial-goticular rotacional (no presente estudo foi limitado pela capacidade máxima do alimentador), visando uma aplicação de correntes médias mais altas do que se consegue com o MIG/MAG convencional, tanto para maior volume do cordão como para soldar em maiores velocidades;
- ✓ Avaliar, por meio de calorimetria, o calor que é transferido à chapa na presença apenas do arco interno (processo MIG/MAG convencional), posteriormente na presença apenas do arco externo e, finalmente, na presença dos dois arcos, para entender o papel do arco externo na transferência de calor para a chapa e para o meio ambiente (agindo ou não como isolante, como sugerido ao longo deste trabalho).

CAPÍTULO XI

REFERÊNCIAS

ALASSUS, K.; BÜRKNER, G; MATTLES, K. J. Plasma-MIG-Prozesssimulation unter applikativen Aspekten. **Schweißen und Schneiden**. Vol. 59 nº 12. pp 668-677. 2007.

ARAUJO, D. B.; VILARINHO, L. O.; RESENDE, A. A. Investigação da Transferência Metálica por meio do Processamento Digital de Imagem In: 6º COBEF - Congresso Brasileiro de Engenharia de Fabricação. **Anais...** Caxias do Sul – RS. 2007. 7p.

ASAI, S.; OGAWA, T.; ISHIZAKI, Y.; MINEMURA, T.; MINAMI, H. AND MIYAZAKI, S. Application of Plasma-MIG Hybrid Welding to Dissimilar Joint Between Copper and Steel. **IIW Doc**. No.XII-1972-09. 2009.

BÁLSAMO, P.S.S., VILARINHO, L. O., VILELA, M. & SCOTTI, A.; Development of an Experimental Technique for Studying Metal Transfer in Welding: Synchronized Shadowgraphy, In: Int. **J. for the Joining of Materials**, vol 12, no. 1, 2000, The European Institute for Joining of Materials (JOM), Denmark, pp. 1-12 (ISSN 0905-6866). 2000.

BICA, I.; MUCSY, G.; NECULAE, A. Fenómenos Físicos Relacionados com el Procedimiento MIG-Plasma. Equipos y Resultados Experimentales. **Revista de soldadura**. p 84-89. 1995.

Choi, S. K.; Kim, Y.S.; Yoo, C. D. Dimensional Analysis of Metal Transfer in GMA Welding. **Journal of Physics D: Applied Physics**. Volume 32. Number 3. doi:10.1088/0022-3727/32/3/021. (1999).

DYKHNO, I.; DAVIS, R. Joining GMAW and GTAW. **The Fabricator**. Nov. 2006. p. 60-62.

ESSERS, W. G; JELMORINI, G; TICHELAAR, G. W. Arc Characteristics and Metal Transfer with Plasma-MIG Welding. **Metal Construction and British Welding Journal**. Dec. 1972. p. 439 - 447.

ESSERS, W. G. New Process Combines Plasma with GMA Welding. **Welding Journal**. 1976. p 394-400.

ESSERS, W.G. et al. Plasma-MIG Welding – a New Torch and Arc Starting Method. **Metal Construction**. Jan. 1981. p 36-42.

ESSERS, W. G.; WALTER, R. Heat Transfer and Penetration Mechanisms with GMA and Plasma-GMA Welding. **Welding Journal**, vol. 60, 1981. pp. 37-42.

HARRIS, I. D. Plasma-MIG Welding. In: **ASM Metals Handbook** Volume 6 - Welding, Brazing, and Soldering (ASM International). 1994.

HYPERPHYSICS. Resistivity and Temperature Coefficient at 20 °C. Disponível em: <<http://hyperphysics.phy-astr.gsu.edu/hbase/tables/rstiv.html>>. Acesso em: 29 jun. 2013.

HU, J. E TSAI, H. L. Heat and Mass Transfer in Gas Metal Arc Welding. Part I: The Arc. **International Journal of Heat and Mass Transfer**, Vol. 50, No. 5-6. (March 2007), pp. 833-846, doi:10.1016/j.ijheatmasstransfer.2006.08.025. 2007.

IGNATCHENKO, G. E DYKHNO, I. **MIG-Plasma Welding**. World Intellectual Property Organization. Patent nº: WO 2004/043637 A1. 27 may 2004.

JONES, L. A., EAGAR, T. W., LANG, J. H. A Dynamic Model of Drops Detaching from a Gas Metal arc Welding Electrode. **Journal of Physics D: Applied Physics**. 31 (1998). p 107–123. 1998.

KAH, P.; MARTIKAINEN, J. Influence of Shielding Gases in the Welding of Metals. **The International Journal of Advanced Manufacturing Technology**. February 2013, Volume 64, Issue 9-12, pp 1411-1421. 2013.

KATAYAMA, T.; TASHIRO, S.; TANAKA, M. Improvement of Bead Formation in Plasma MIG Welding Process in Pure Argon Atmosphere. **Transactions of JWRI**, Vol.39 (2010), No. 2. P 195-196. 2010.

KIM, C.H.; AHN, Y.N.; LEE, K.B. Droplet Transfer During Conventional Gas Metal Arc and Plasma-Gas Metal Arc Hybrid Welding With Al 5183 Filler Metal. **Current Applied Physics**, Volume 12, Supplement 2, September 2012, Pages 178-183.

LANCASTER, J. F. **The Physics of Welding**. Ed. Pergamon Press. 2nd ed. pp 47–76. 1986.

LISKEVYCH, O.; QUINTINO, L.; VILARINHO, L. O.; SCOTTI, A. Intrinsic Errors on Cryogenic Calorimetry Applied to Arc Welding. **Welding in the World**. May 2013, Volume 57, Issue 3, pp 349-357. 2013.

LISKEVYCH, O., SCOTTI, A., Influência do Teor de CO₂ Sobre Formação e Geometria do Cordão de Solda em Soldagem MIG/MAG por Curto-Circuito. 10º Congresso Ibero Americano de Engenharia Mecânica - CIBEM 2011. Porto, Portugal. FEIBIM, **Anais...** 4-7 de Setembro de 2011.

LOWKE, J. J. Physical Basis for the Transition from Globular to Spray Modes in Gas Metal Arc Welding. **Journal of Physics D: Applied Physics**. doi:10.1088/0022-3727/42/13/135204. Volume 42, Número 13. 7 p. 2009.

LYTTLE, K.A.; STAPON, W.F.G. Select the Best Shielding Gas Blend for the Application. **Welding Journal**. v. 69, n. 11, p. 21-27, 1990.

LYTTLE, K. A. **Shielding Gases for Welding**. In: ASM Handbook Volume 6 - Welding, Brazing, and Soldering (ASM International). 1994. Pages: 64-69

LYTTLE, K. A. Simplifying Shielding Gas Selection. **Practical Welding**. Vol9. Nº1. Jan/Feb 2005.

MATTHES, K; KOHLER, T. Electrical Effects and Influencing Quantities in the Case of the Hybrid Plasma-MIG Welding Process. **Welding and Cutting**, Feb. 2002. p. 87 – 90.

MESSLER, R. W. Jr. What's Next for Hybrid Welding. **Welding Journal**. 83 (3). Mar 2004. p 30-34.

MURRAY, P. E., SCOTTI, A. Depth of Penetration in Gas Metal Arc Welding. **Science and Technology of Welding and Joining**. Vol. 4 No. 2, 1999. pp 112 – 117.

NORRISH, J. **Advanced Welding Process**. IOP Publishing Ltd, 1992. 375 p. ISBN:0-85274-325-4.

OLIVEIRA, M. A. **Desenvolvimento do Processo de Soldagem Híbrido Plasma-MIG para Operações de Soldagem e Brasagem**. Tese de Doutorado, Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis, SC. 2006. 148f.

OLIVEIRA, M. A.; DUTRA, J. C. Electrical Model for the Plasma-MIG Hybrid Weld Process. **Welding and Cutting**. nº6. 2007. p 324-328.

OKADA, T., YAMAMOTO, H.; HARADA, S. Observation of the Shielding Gas Flow Pattern During Arcing by Use of a Laser Light Source, **Arc Physics and Weld Pool Behavior**, The Welding Institute, Cambridge, pp. 203-213. 1980.

ONO, K., LIU, Z., ERA, T., UYEYAMA, T.; TANAKA, M. Development of Plasma GMA Welding System. **Journal of the Japan Welding Society**. Vol 27. IIW Doc. No. XII-1973-09. p 45-49. 2009.

PLT. Plasma Laser Technologies (PLT). Disponível em: <<http://www.plasma-laser.com/new/about.asp>>. Acesso em: 15 ago. 2013.

RHEE, S.; KANNATEY-ASIBU Jr., E. Observation of Metal Transfer During Gas Metal Arc Welding. **Welding Journal**. October, 1992. pp 381-386.

REIS, R.; SCOTTI, A. **Fundamentos e Prática da Soldagem a Plasma**, Artliber Editora, 1ª ed., 2007. ISBN 978-85-88098-39-8. 147p.

RESENDE, A. A. **Uma Contribuição à Análise dos Parâmetros de Soldagem do Processo Plasma-MIG com Eletrodos Concêntricos**. 153 f. Dissertação de Mestrado, Universidade Federal de Uberlândia, Uberlândia - MG. 2009.

RESENDE, A. A.; KEOCHEGUERIAN, F.; VILARINHO, L. O. The Influence of CO₂ and O₂ Content on Globular Spray Transition Current when Using Argon-Based Blends in GMAW of ER 70S 6 Wire. **Welding International**, 24: 8, p 593 - 601. 2010.

REIS, R. P.; SOUZA, D.; SCOTTI, A. Models to Describe Plasma Jet, Arc Trajectory and Arc Blow Formation in Arc Welding. **Welding in the World**, v. 55, p. 24-32, 2011.

ROSSI, M. L. **Uma Contribuição ao Conhecimento da Física do Arco Aplicado em Soldagem**. 81 f. Dissertação de Mestrado, Universidade Federal de Uberlândia, Uberlândia-MG. 2011.

SLV. Plasma MSG Schweißen. Disponível em: <http://www.slv-muenchen.de/fileadmin/user_upload/Muenchen/pdf-Dateien/alle-Geraeteflyer-Schutzgas.pdf> Acesso em: 26 abril 2012. 5 p.

SCOTTI, A.; PONOMAREV, V. **Soldagem MIG/MAG: Melhor Entendimento, Melhor Desempenho**. Editora Artliber, 1ª ed., 2008. ISBN: 85-88098-42-8. 284 p.

SCOTTI, A.; PONOMAREV, V.; LUCAS, W., A Scientific Application Oriented Classification for Metal Transfer Modes in GMA Welding. **Journal of Materials Processing Technology**. (2010), doi:10.1016/j.jmatprotec. 2012.

SCOTTI, A.; PONOMAREV, V.; RESENDE, A. A. The Influence of the Electrode Materials and Shielding Gas Mixture on the Specific Electric Resistances of the Drop/Column of the Arc in MIG/MAG Welding. In: 59th Annual Assembly of the International Institute of Welding, 2006, Quebec. 59th Annual Assembly of the International Institute of Welding. Paris: IIW/ISS, **Anais...** CD rom. 2006. p. 1-9.

SCOTTI, A.; RODRIGUES, C.E.A.L. Determination of Momentum as a Mean of Quantifying the Mechanical Energy Delivered by Droplets During MIG/MAG Welding. **Eur. Phys. J. Appl. Phys.** DOI: 10.1051/epjap: 2008196. 2009. 8p.

SCOTTI, A.; RODRIGUES, C.E.A.L, Determination of the Momentum of Droplets Impinging on the Pool During Aluminium GMAW, **Soldagem & Inspeção**, (ISSN 0104-9224 printed/ISSN 1980-6973 on-line), doi: 10.1590/S0104-92242009000400008. Vol. 14, No. 4, Out/Dez 2009, pp. 336-343.

SOUZA, D.; RESENDE, A. A.; SCOTTI, A. Um Modelo Qualitativo para Explicar a Influência da Polaridade na Taxa de Fusão no Processo MIG/MAG. In: 4º COBEF - Congresso Brasileiro de Engenharia de Fabricação. Estância de São Pedro – SP. **Anais...** Estância de São Pedro – SP. 2007. 10p.

SUBAN, M.; TUSEK, J. Methods for the Determination of Arc Stability. **Journal of Materials Processing Technology**, Volume 143, p. 430-437, 2003.

TANAKA, M.; et al. Characteristics of Ionized Gas Metal Arc Processing. **Surface & Coatings Technology**. Vol. 202. Jun. 2008. p 5251-5254.

TBI. TBI Industries GmbH: The History. Disponível em: <<http://www.tbi-industries.com/english/TBI/tbi.html>> Acesso em: 15 ago. 2013.

TBI. Plasma-MSG Welding Torch: Operation Instructions - Model PLM500. Versão de 15/11/2006. 8p. 2006.

VILARINHO, L.O., **Desenvolvimento e Avaliação de um Algoritmo Alternativo para Soldagem MIG Sinérgica de Alumínio**. Dissertação de Mestrado, Universidade Federal de Uberlândia-MG, 2000. 111p.

VILARINHO, L. O. Modos Fundamentais de Transferência Metálica: Naturais e Controlados. **Revista da Soldagem**, 10 maio 2007. p. 14-19.

XU, G.; HU, J.; TSAI, H.L.. Three-Dimensional Modeling of Arc Plasma and Metal Transfer in Gas Metal Arc Welding. **International Journal of Heat and Mass Transfer**, Volume 52, Issues 7–8, March 2009, Pages 1709–1724.

YAN, B.; HONG-MING G.; LING Q. Droplet Transition for Plasma-MIG Welding on Aluminium Alloys. **Transactions of Nonferrous Metals Society of China**, Volume 20, Issue 12, December 2010, Pages 2234-2239.

YAN, B.; HONG-MING G.; LIN, W.U.; ZHAO-HUI, M.A.; NENG C.A.O. Influence of Plasma-MIG Welding Parameters on Aluminum Weld Porosity by Orthogonal Test. **Transactions of Nonferrous Metals Society of China**, Volume 20, Issue 8, August 2010, Pages 1392-1396.

YENNI, D. M.; WILLIAMSVILLE, N. Y. **High Pressure Arc Process and Apparatus** United States Patents Office. Patent nº:2,847,555. Oct 11, 1955, Aug. 12, 1958.

Zielinska, S.; Pellerin, S.; Valensi, F.; Dzierzega, K.; Musiol, K.; Ch. de Izarra and Briand, F. Gas influence on the arc shape in MIG-MAG welding. **The European Physical Journal Applied Physics**, 43, pp 111-122. doi:10.1051/epjap:2008106. 2008.

WANG, F.; HOU, W. K.; KANNATEY-ASIBU, E.; SCHULTZ, W. W.; WANG, P. C. Modelling and Analysis of Metal Transfer in Gas Metal Arc Welding. **Journal of Physics D: Applied Physics**. pp. 1143-1152. [doi:10.1088/0022-3727/36/9/313](https://doi.org/10.1088/0022-3727/36/9/313). 2003.

APÊNDICE A

PROGRAMA USADO PARA ANÁLISE DE TRANSFERÊNCIA METÁLICA EM VOO LIVRE

O código que segue foi inicialmente desenvolvido por Araujo et al. (2007), sobre o qual algumas rotinas foram acrescentadas para atender as necessidades deste trabalho.

```
1 function Gotas
2 %=====
3 % Universidade Federal de Uberlândia
4 % Faculdade de Engenharia Mecânica
5 % Laprosolda
6 % Atualização: 2013
7 clc;
8 clear all;
9 close all;
10 %===== Entrada de dados=====
11 disp(' ');
12 disp(' ');
13 disp('..... IMAGENS ..... ');
14 disp(' ');
15 [calibra,caminhol] = uigetfile('*.','Selecione a Figura de Calibração');
16 strFileName = [caminhol,calibra];
17 i = imread(strFileName);
18 imshow(i); text(120,10,'Entre com o
19 diâmetro','Color','y','FontSize',12,'FontWeight','bold');
20 ginp=ginp(2);
21 close all;
22 fator=ginp(1,2)-ginp(2,2);
23 prompt = {'Entre com o diametro do eletrodo[mm]:'};
24 dlg_title = '';
25 num_lines = 1;
26 def = {'1.2'};
27 answer = inputdlg(prompt,dlg_title,num_lines,def);
28 diametro=str2double(answer{1});
29 fcor=diâmetro/fator;
30 imshow(i); text(120,10,'Entre com a posição da
31 chapa','Color','y','FontSize',12,'FontWeight','bold');
32 ginp2=ginp(1);
33 close all;
34 [nomeprim,caminhol] = uigetfile('*.','Selecione o primeiro arquivo
35 TIFF',caminhol);
36 [nomeult,caminhol] = uigetfile('*.','Selecione o ultimo arquivo
37 TIFF',caminhol);
38 pos=find(nomeprim=='p');%separa nome de numero
39 primnome=nomeprim(1:pos);
40 iStart=str2double(nomeprim(pos+1:length(nomeprim)-4));
41 iEnd=str2double(nomeult(pos+1:length(nomeult)-4));
```

[illegible]


```

166     diam=sqrt(4*area/pi)*fcor;
167     diametroo(passo)=diam;
        diametro = sprintf('d=%2.3f',diam);
168     text(centroid(1)-20,centroid(2)+80,diametro,'Color','g',...
169         'FontSize',12,'FontWeight','bold');
170     plot(boundary(:,2), boundary(:,1), 'w', 'LineWidth', 1);
171     elseif length(B)==5 && k==5
172         max2=ginp2(1);
173         ca=(max2-max1)*fcor;
        posi=(max1+max2)/2;
174         plot(ginp2(1),1:300,'r-');
175         metric_string0 = sprintf('%2.2f',ca);
176         text(posi-20,10,metric_string0,'Color','r',...
177             'FontSize',12,'FontWeight','bold');
178         plot(boundary(:,2), boundary(:,1), 'w', 'LineWidth', 1);
179     end
180     metric_string = sprintf('%2.3f',centroid(1)*fcor);
181     text(centroid(1)-10,centroid(2)-10,metric_string,'Color','k',...
182         'FontSize',08,'FontWeight','bold');
183     metric_string2 = sprintf('A=%2.1f',area);
184     text(centroid(1)-10,centroid(2)+10,metric_string2,'Color','m',...
185         'FontSize',08,'FontWeight','bold');
186     ar(k)=area;
        centroide(passo)=centroid(1);
187     passo=passo+1;
        F=getframe(gca);
        %mov=addframe(mov,F);
188     text(-398,266,'', 'Color','k', 'FontSize',10);
189 end
190 dbcp(frames)=ca;
191 Frame = sprintf('Frame n°= %1.0f',frames);
192 text(-70,266,Frame,'Color','k', 'FontSize',12,'FontWeight','bold');
193 frames=frames+1;
194 close (fig(ff-2));
195 end
196
197 %==== Gráfico do centroide =====
198 pa=1;
199 tam=length(centroide);
200 for iii=1:tam
201     if centroide(iii)<=max1 || centroide(iii)>=max2
202         centroide(iii)=0;
203     else
204         ce(pa)=centroide(iii)*fcor;
205         pa=pa+1;
206     end
207 end
208 figure('Position',[50 50 1200 300]); % Posiciona a figura
209 plot(ce,'ro');ylabel('Posição da Gota');xlabel('FRAME');grid;
210 figure('Position',[50 500 1200 300]); % Posiciona a figura
211 plot(dbcp,'ko');ylabel('Comprimento do Arco [mm]');xlabel('FRAME');grid;
212 figure('Position',[50 500 1200 300]); % Posiciona a figura
213 plot(diametroo,'ro');ylabel('Diâmetro da Gota [mm]');xlabel('FRAME');grid;
214 figure('Position',[50 50 1200 300]); % Posiciona a figura
215 plot(Area,'ro');ylabel('Area do Eletrodo');xlabel('FRAME');grid;
216 %mov=close(mov);
217
218 diam=diametroo;
219 [a,dd]=size(diam);
220 ddiam=[];
221 contgota=0;
222 q=1;
223 m=[];
224 for cd=1:dd-4
225
226     if diam(cd)~=0
227         temp(q,1)=diam(cd);

```

```

228         q=q+1;
229     end
230     if diam(cd)~=0 & diam(cd+1)==0 & diam(cd+2)==0 & ...
231         diam(cd+3)==0 & diam(cd+4)==0 %& diam(cd+5)==0 & diam(cd+6)==0
232         contgota=contgota+1;
233         mm=mean(temp);
234         m(contgota,1)=mm;
235         temp=[];
236         q=1;
237     end
238 end
239 disp('diametro médio das gotas [mm]')
240 diametro=m
241 disp('numero de gotas')
242 contgota
243 periodo=((iEnd-iStart)/2000)/contgota
244 disp('frequencia [Hz]=[gotas/segundo]')
245 frequencia=1/periodo
246
247 %=====velocidades+++++++
248 espaco=ce;
249 [a,dd]=size(espaco);
250 minimo=min(espaco);
251 maximo=max(espaco);
252 esp=[];
253 contgotav=0;
254 q=1;
255 for cd=1:dd
256     if espaco(cd)<(maximo-1)
257         novoesp(q,1)=espaco(cd);
258         q=q+1;
259     end
260 end
261 novoesp=novoesp';
262 [b,cc]=size(novoesp);
263 vm=[];
264 k=1;
265 temp=[];
266 am=[];
267 vc=[];
268 vs=[];
269 gotaquadro=[0];
270 posicaodagota=[];
271
272 for ad=1:cc-1
273     if novoesp(ad)<(novoesp(ad+1));
274         temp(k,1)=novoesp(ad);
275         k=k+1;
276     else
277         contgotav=contgotav+1;
278         r=length(temp);
279         if r>1
280             velche=(temp(r)-temp(r-1))*2;
281             velsai=(temp(2)-temp(1))*2;
282             vc(contgotav,1)=velche;
283             vs(contgotav,1)=velsai;
284             quadros(contgotav,1)=k;
285             a=((velche-velsai)*2000)/k;
286             am(contgotav,1)=a;
287             temp=[];
288             gotaquadro(contgotav,1)=k;
289             k=1;
290             posicaodagota=temp;
291         end
292     end
293 end

```

```
294 disp('acel. média [m/s²]')
295 am
296 disp('vel de saída [m/s]')
297 vs
298 disp('vel de chegada [m/s]')
299 vc
300 disp('quantidade de quadros por gota')
301 gotaquadro
302 contgotav
303 %-----Comprimento médio do arco-----
304 disp('Comprimento médio do arco [mm]')
305 compmedio=mean(dhcp)
306 disp('posição das gotas')
307 espaco'
308 toc;
309 end
310 function [a]=dil(x)
311 %Dilatação
312 se90 = strel('line',3, 90);
313 se0 = strel('line', 3, 0);
314 a = imdilate(x, [se90 se0]);
315 end
```

APÊNDICE B

GUIA DE UTILIZAÇÃO DO PROGRAMA ANALISADOR DE TRANSFERÊNCIA METÁLICA EM VOO LIVRE

O programa analisador de imagens foi desenvolvido na versão 7.9.0 (R2009b) do Matlab®, portanto, ao ser utilizado em outras versões, poderá apresentar algum problema de compatibilidade. Para a utilização do programa, são necessárias as sequências de imagens obtidas nas filmagens à alta velocidade por meio da técnica perfilografia, que devem obedecer aos seguintes requisitos:

- a) As imagens para cada análise devem estar no formato TIFF e salvas em uma mesma pasta;
- b) As imagens devem estar nomeadas de acordo com o padrão “pjn”, onde “p” é o prefixo, “s” o caractere de separação, e “n” o número que identifica a imagem na sequência, conforme os exemplos: ‘datap1001.tif’, ‘datap1002.tif’, ‘datap1003.tif’, ...
- c) Se o usuário desejar, pode modificar o caractere de separação alterando o termo entre aspas no comando localizado a linha 37 do programa:

```
pos=find(nomeprim=='p')
```

- d) Se for necessário renomear uma grande quantidade de arquivos para adequar ao programa, o usuário pode utilizar o programa “*Renomear Tudo*” que é gratuito e facilmente localizado por provedores de busca na internet, assim como tutoriais de utilização.

Estando as imagens de acordo com os requisitos descritos anteriormente, o programa já pode ser executado de acordo com os seguintes passos:

- 1º - A partir do menu “iniciar” do Windows, executar o Matlab 7.9.0(R2009b);
- 2º - Abrir o arquivo onde está gravado o código;
- 3º - Executar o programa (tecla de atalho *F5*) e proceder conforme segue;
- 4º - Ao iniciar a execução, o programa solicita ao usuário que selecione um arquivo para calibração;
- 5ª - Com a imagem aberta, o usuário deve selecionar dois pontos em que conheça a distância, conforme Figura B.1;

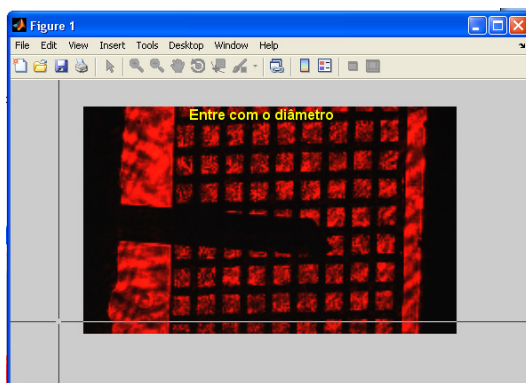


Figura B.1 – Janela com tela graduada posicionada na região do eletrodo

6º Neste momento o usuário deve informar a distância conhecida (o valor 1,2 é mostrado como padrão, mas pode ser alterado de acordo com a distância selecionada) conforme Figura B.2.

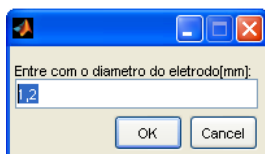


Figura B.2 – Janela para digitação da distância selecionada

7º Com o mouse o usuário deve selecionar a posição em que se encontra a chapa, conforme Figura B.3;

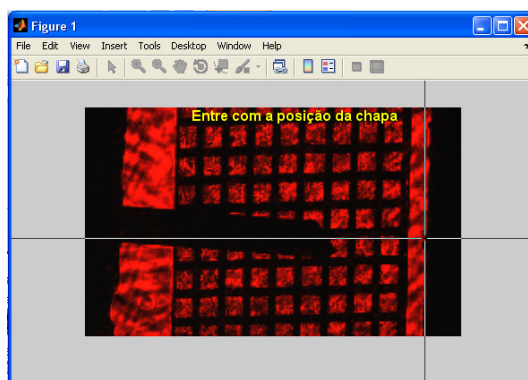


Figura B.3 – Janela para seleção da posição da chapa

8º Na sequência são apresentadas duas caixas de dialogo (Figura B.4) para o usuário selecionar o primeiro e o último arquivo de imagem no formato TIFF a ser analisado;

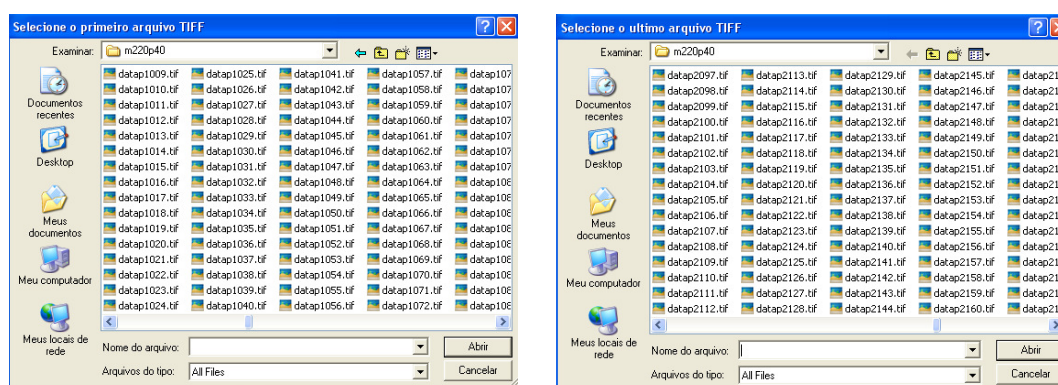


Figura B.4 – Janela para seleção do primeiro (esquerda) e último (direita) arquivo

9º) Após selecionar a última imagem, o programa inicia a análise, quadro a quadro e ao final apresenta os resultados na tela principal do Matlab®. É importante que o usuário acompanhe a execução do programa, que apresenta ao mesmo tempo na tela a imagem original e a imagem filtrada com destaque para a região do arame, gota e metal de base. Durante o período em que a gota está sendo transferida é possível visualizar o diâmetro instantâneo da gota, conforme Figura B.5. Nesta imagem, é possível observar que a imagem tratada é compatível com a imagem original, indicando que o programa esta executando de forma coerente.

Pode acontecer de a imagem apresentar alguma discordância em relação à imagem original, no entanto, é possível modificar alguns parâmetros para fazer a correção. Em função da qualidade e da quantidade de ruídos presentes na imagem, é necessário que o usuário altere alguns parâmetros que o programa utiliza durante o tratamento das imagens. O primeiro passo é selecionar o limiar da função “im2bw” (linha 60). A função

im2bw é responsável pela conversão da imagem do formato RGB para binária (preto e branco) e o limiar é o fator de corte. O efeito do limiar é ilustrado na Tabela B1.

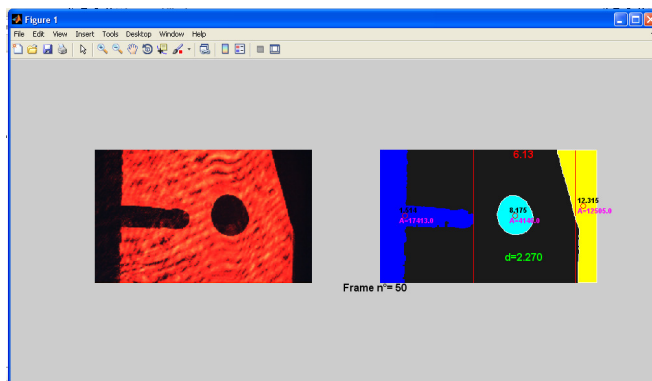


Figura B.5 – Imagem original (esquerda) e tratada (direita) com destaque a região do arame e bocal, gota e metal de base

Tabela B1 – Efeito do limiar sobre a identificação dos elementos da imagem

Limiar	Imagem original e com os elementos identificados		
0,10			
0,15			
0,25			

Caso a imagem apresente ruídos (pequenas manchas) como os mostrados na Figura B.6, estas podem ser removidas com o auxílio da função “bwareaopen” (`bw=bwareaopen(w1,40)`) localizado na linha 70, que remove da imagem os objetos com uma quantidade de pixels menores do que o valor especificado. Ao alterar o valor desta função, o usuário deve ficar atento para não eliminar a própria gota em transferência.



Figura B.6 – Imagem com presença de ruídos

10º Caso as imagens processadas apresentem estejam compatíveis com as imagens processadas, o usuário deve aguardar o processo de análise até que ao final os resultados são apresentados. Na tela principal são apresentados os resultados para diâmetro médio de cada gota, frequência de transferência, aceleração média, velocidade de saída (do arame) e de chegada (na poça de fusão), comprimento médio do arco e posição instantânea de cada gota conforme Tabela B.2, que mostra o resultado para a transferência de quatro gotas.

Tabela B.2 – Exemplo de resultados apresentados na tela do Matlab®

Diâmetro médio das gotas [mm]
2.3314
2.3035
2.1864
2.3014
Frequência [Hz]=[gotas/segundo]
42.7236
Aceleração média [m/s ²]
24.4711
28.1859
22.4340
33.4831
Velocidade de saída [m/s]
0.4430
0.4931
0.4499
0.4793
Velocidade de chegada [m/s]
0.5898
0.6340
0.5845
0.6634
Comprimento médio do arco [mm]

5.7801

Posição das gotas [mm]

7.5396

7.7611

7.9916

8.2408

8.4853

8.7309

8.9962

9.2571

9.5470

9.8448

10.1397

10.4344

11.9914

7.6196

7.8661

8.1167

8.3861

8.6590

8.9422

9.2555

9.5693

9.8863

10.2071

11.8760

11.9498

12.0148

7.2482

7.4731

7.6985

7.9355

8.1884

8.4578

8.7285

8.9840

9.2798

9.5818
9.8741
10.1792
11.8741
11.9474
12.0213
7.5360
7.7756
8.0154
8.2998
8.5696
8.8464
9.1289
9.4451
9.7592
10.0909
10.3958
11.9673

Para facilitar a interpretação dos resultados, estes também são apresentados em gráficos, conforme Figuras B.7, B.8 e B.9.

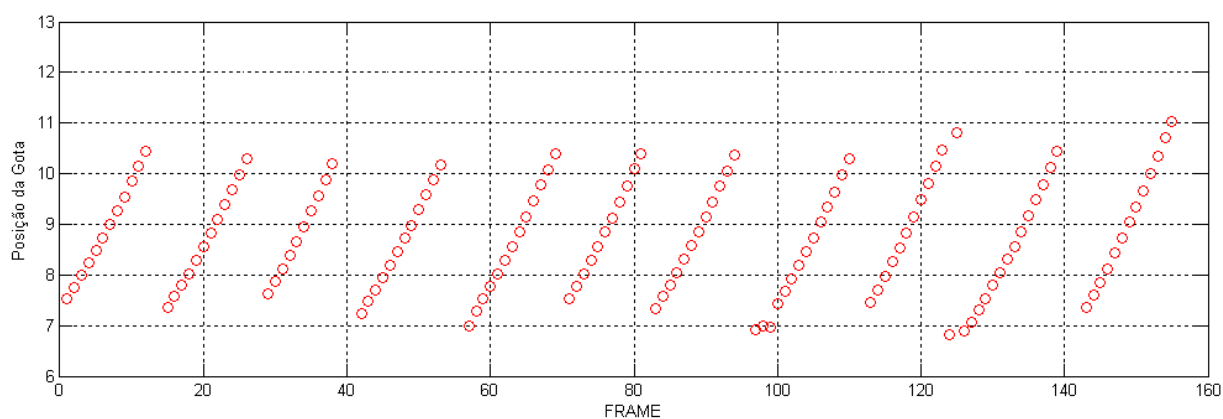


Figura B.7 – Posição da gota para cada quadro analisado

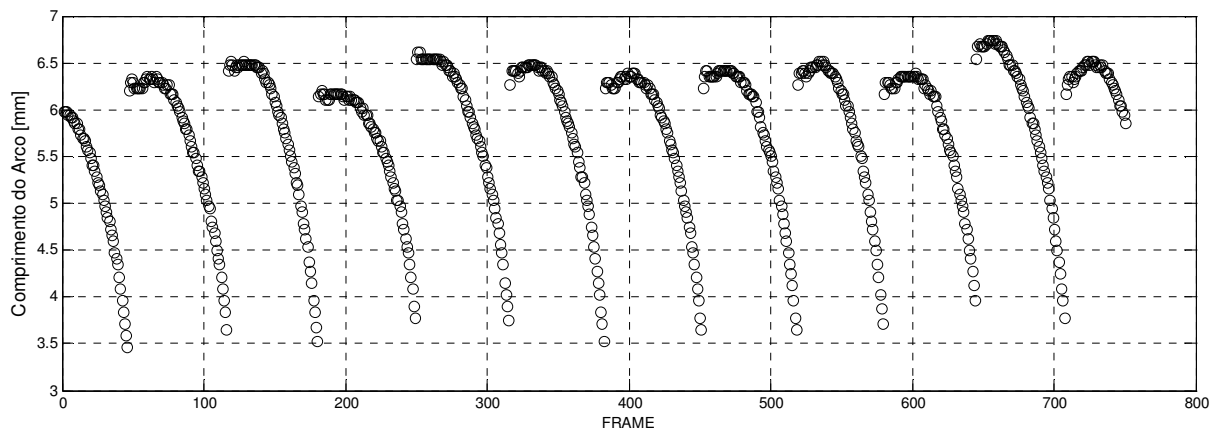


Figura B.8 – Comprimento do arco para cada quadro analisado

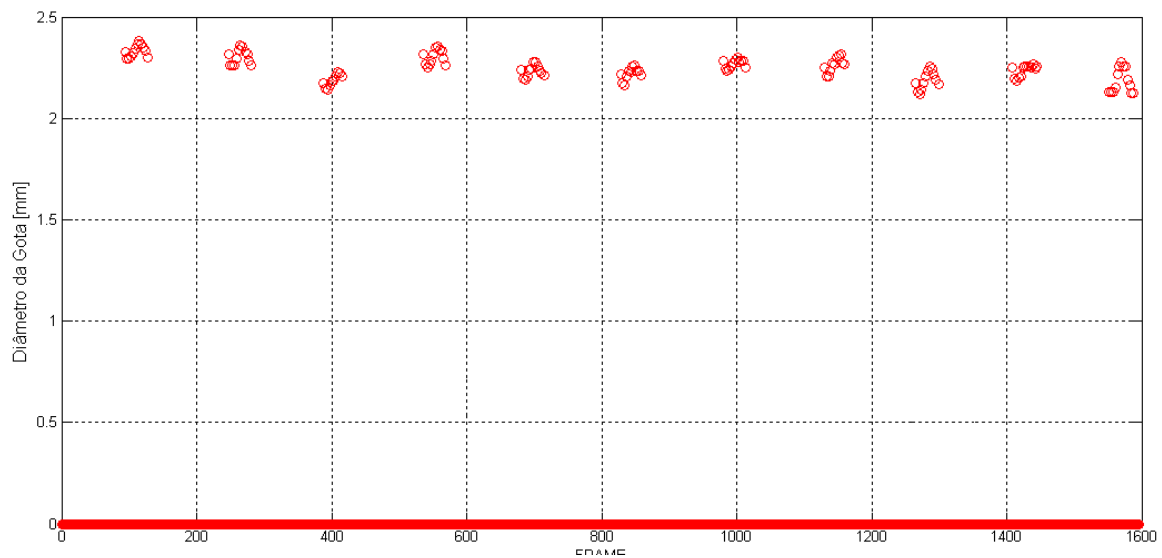


Figura B.9 – Diâmetro da gota para cada quadro analisado

APÊNDICE C

GRAFICOS DE POSIÇÃO DA GOTA EM FUNÇÃO DO TEMPO PARA EXPERIMENTOS DO CAPÍTULO 5

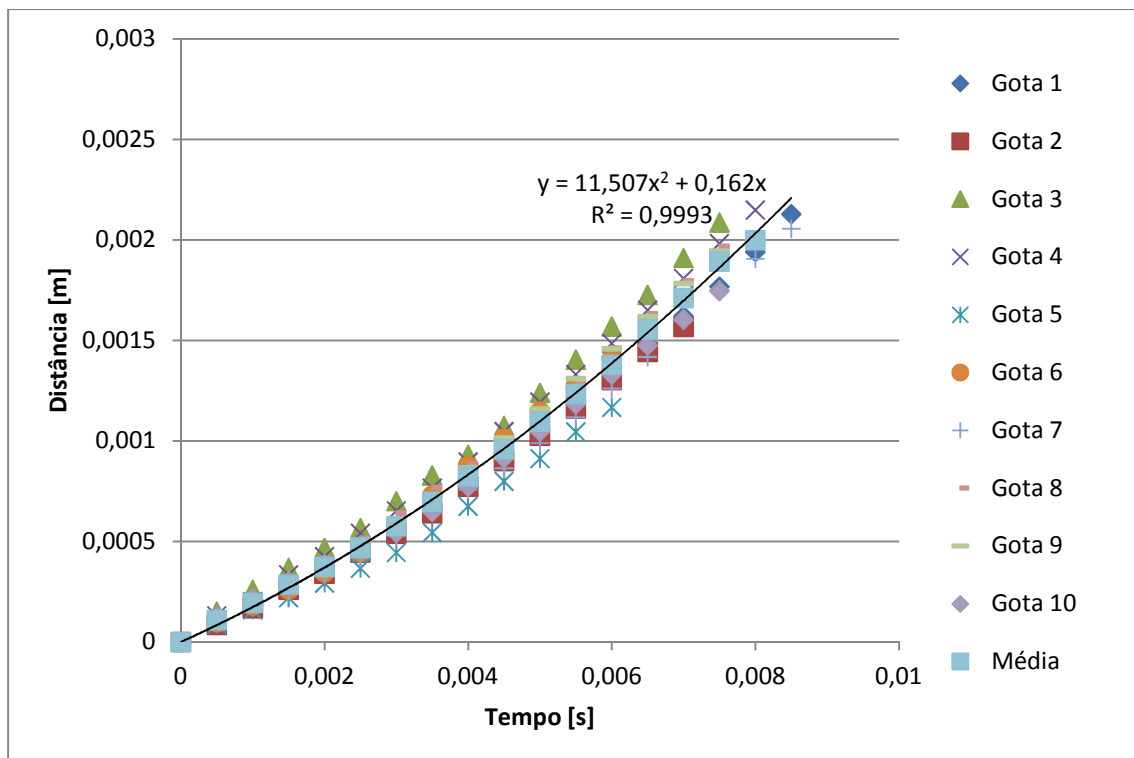


Figura C.1 – Distância percorrida pela gota a partir do destacamento em função do tempo para uma corrente de 180 A no arco interno e de 0 A no arco externo

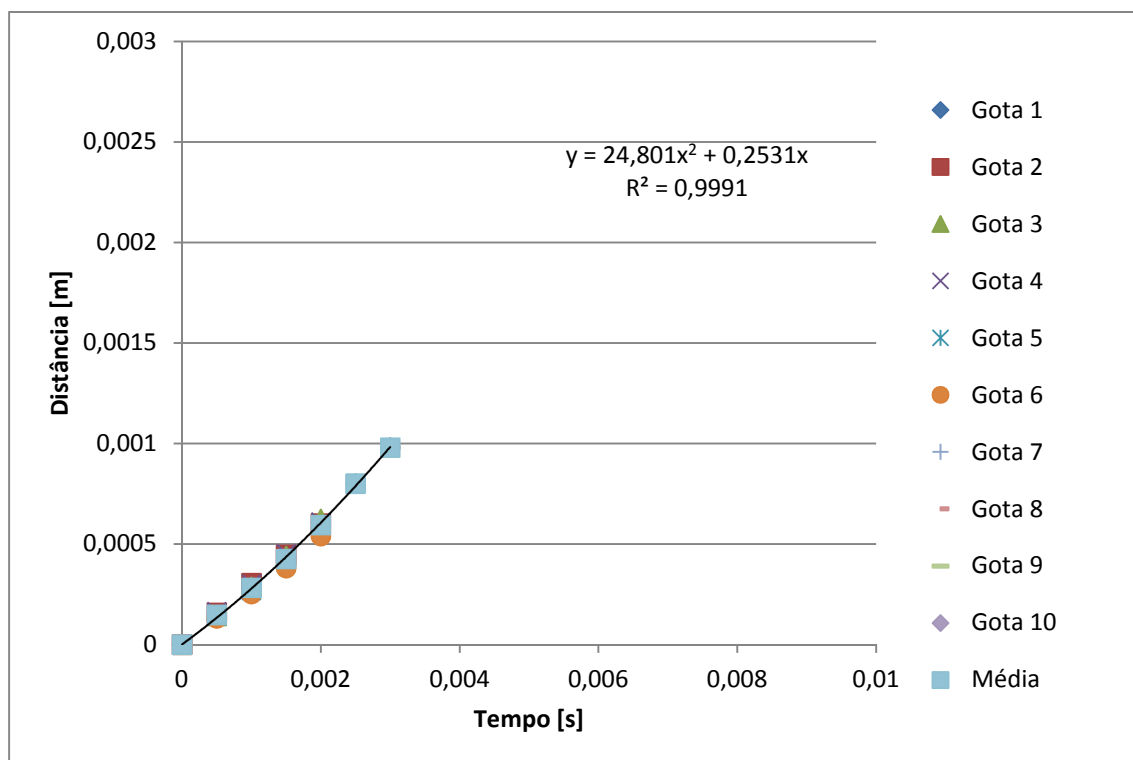


Figura C.2 – Distância percorrida pela gota a partir do destacamento em função do tempo para uma corrente de 200 A no arco interno e de 0 A no arco externo

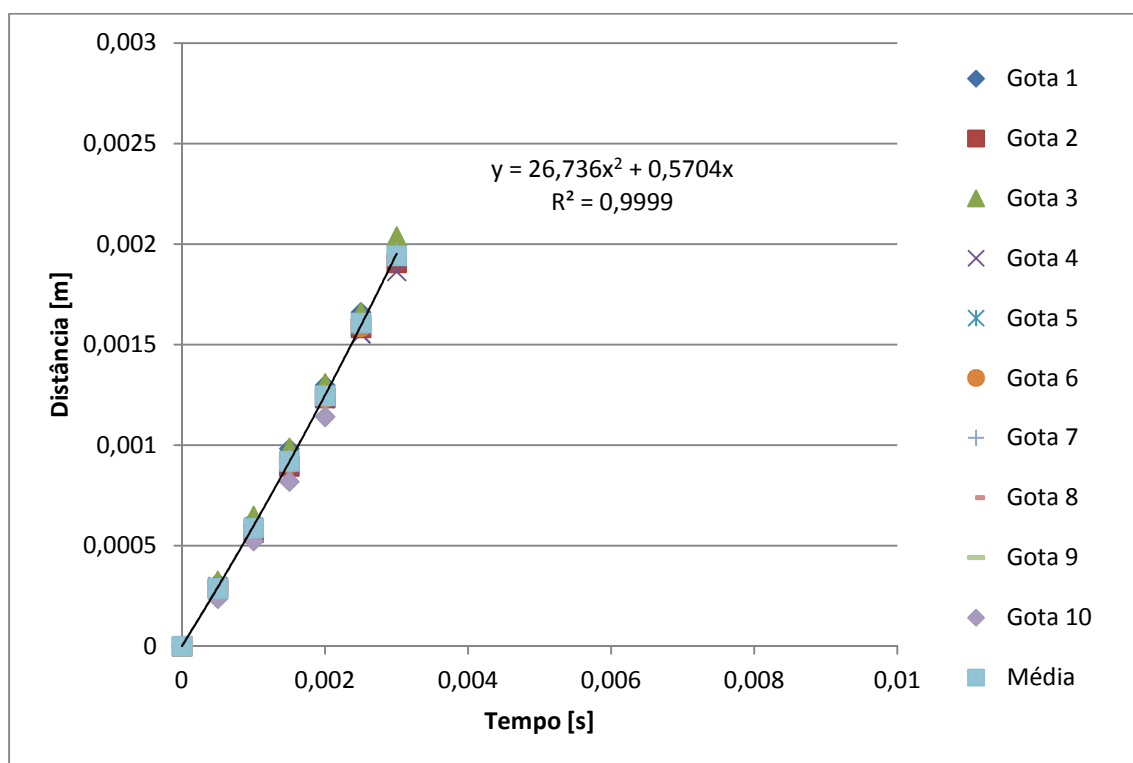


Figura C.3 – Distância percorrida pela gota a partir do destacamento em função do tempo para uma corrente de 220 A no arco interno e de 0 A no arco externo

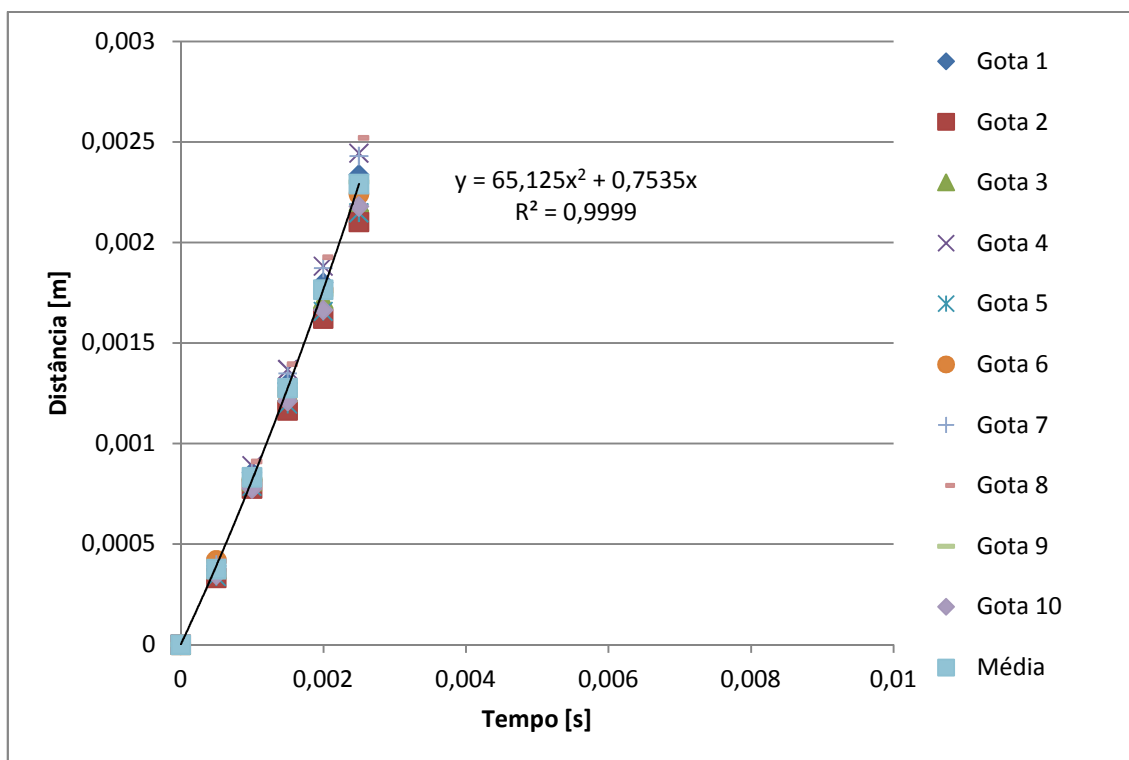


Figura C.4 – Distância percorrida pela gota a partir do destacamento em função do tempo para uma corrente de 230 A no arco interno e de 0 A no arco externo

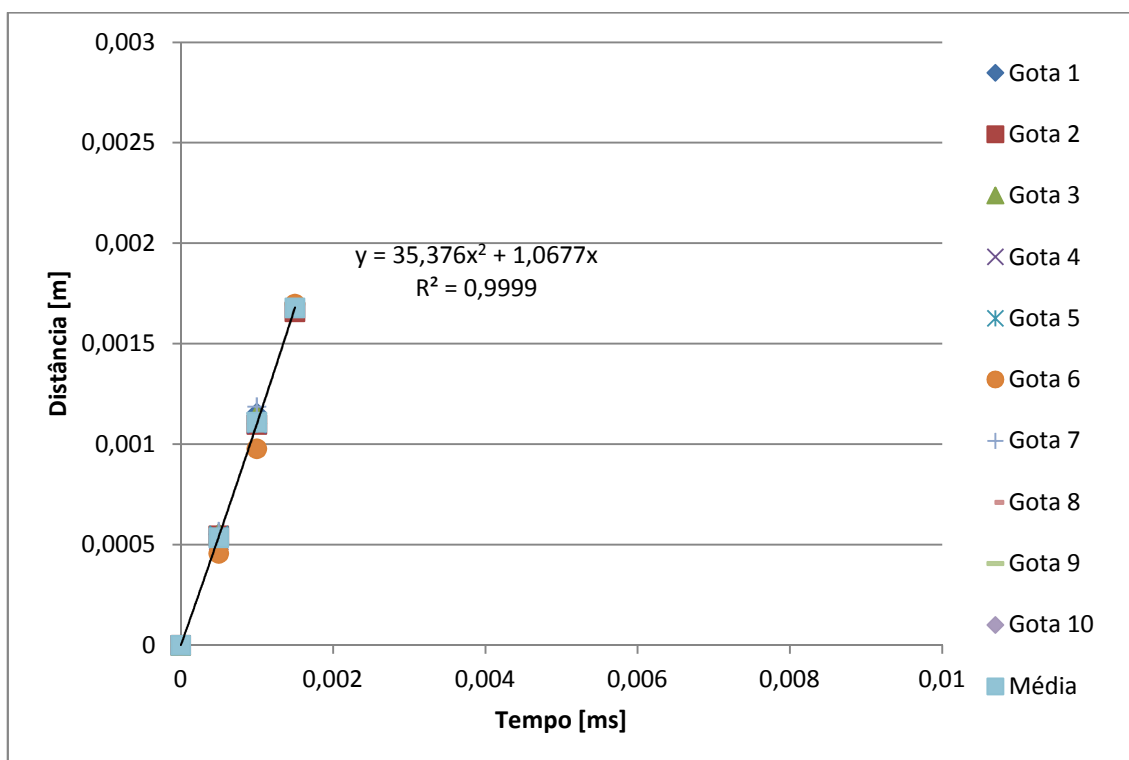


Figura C.5 – Distância percorrida pela gota a partir do destacamento em função do tempo para uma corrente de 240 A no arco interno e de 0 A no arco externo

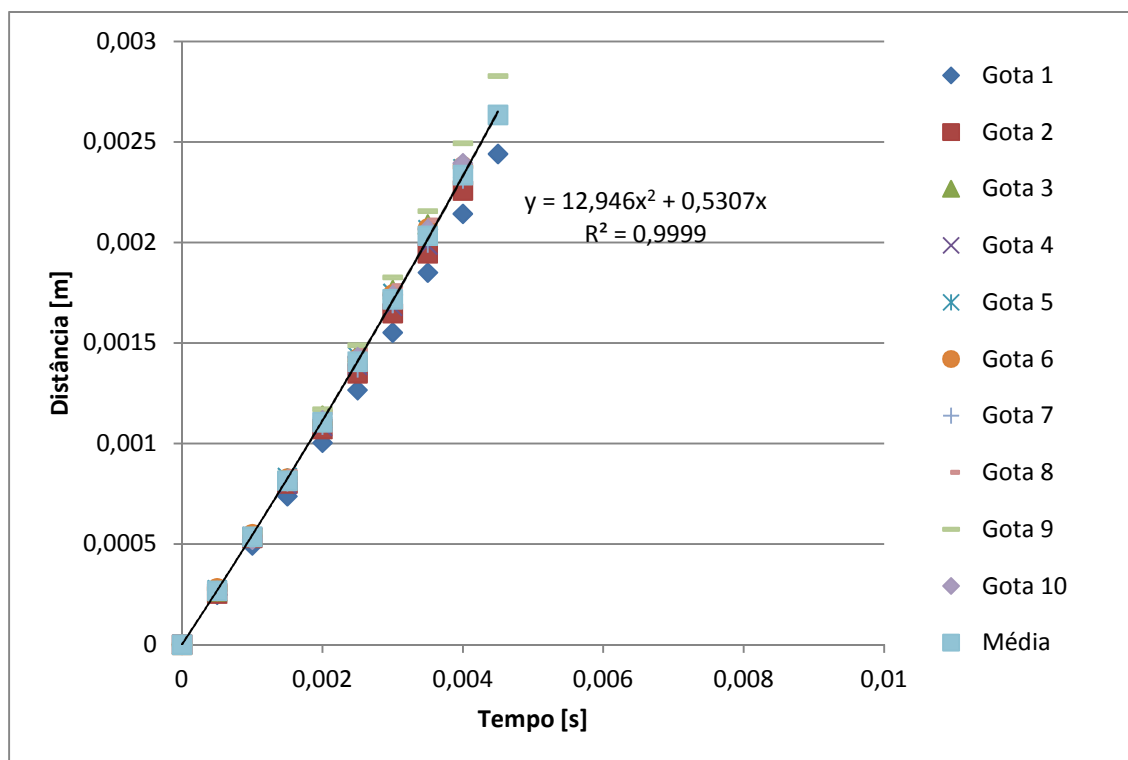


Figura C.6 – Distância percorrida pela gota a partir do destacamento em função do tempo para uma corrente de 220 A no arco interno e de 40 A no arco externo

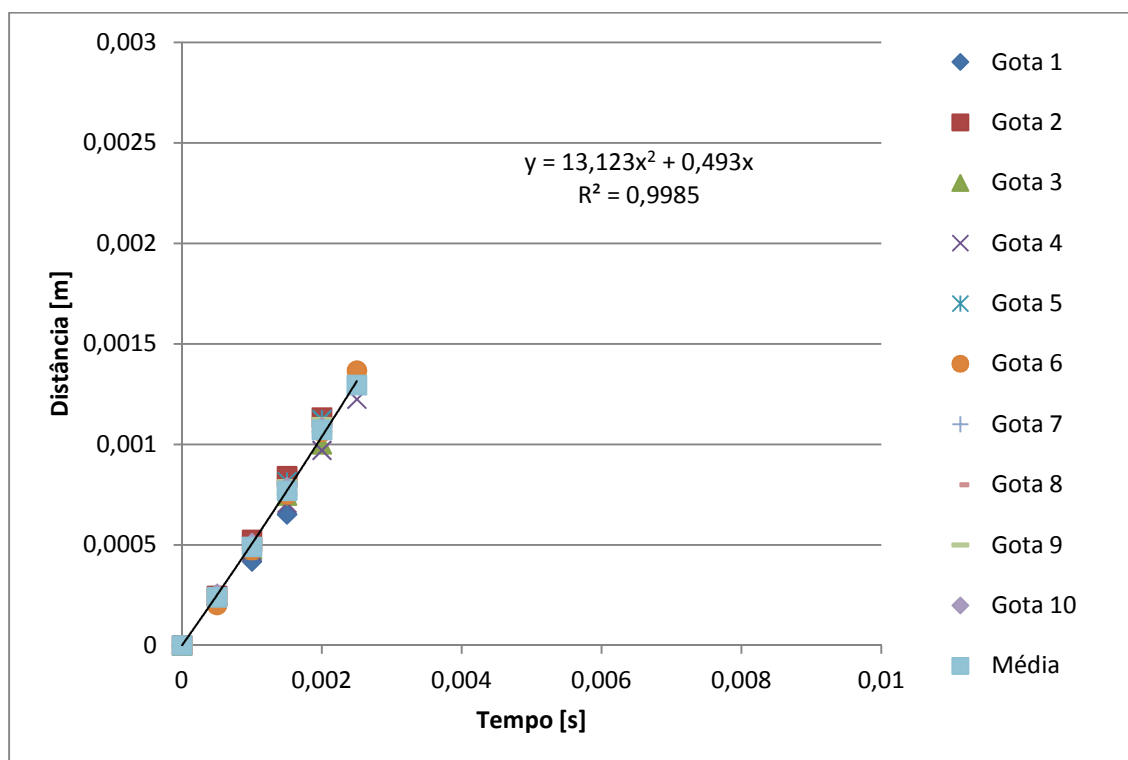


Figura C.7 – Distância percorrida pela gota a partir do destacamento em função do tempo para uma corrente de 230 A no arco interno e de 40 A no arco externo

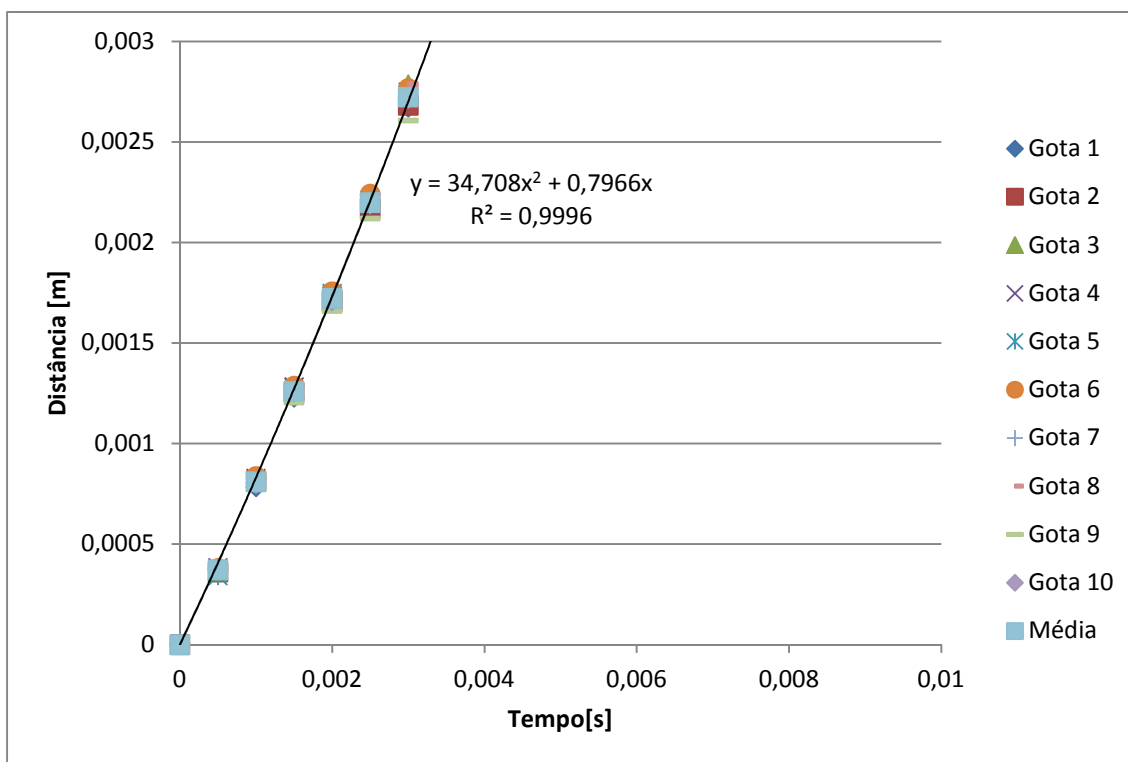


Figura C.8 – Distância percorrida pela gota a partir do destacamento em função do tempo para uma corrente de 240 A no arco interno e de 40 A no arco externo

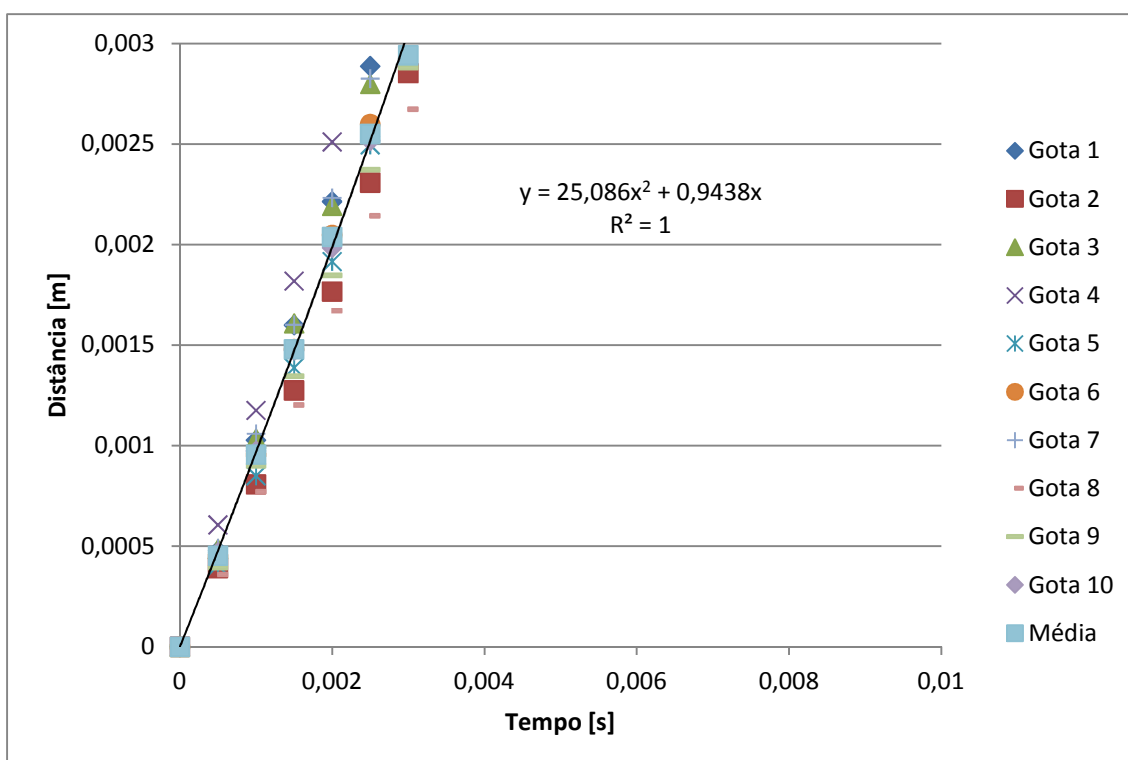


Figura C.9 – Distância percorrida pela gota a partir do destacamento em função do tempo para uma corrente de 250 A no arco interno e de 40 A no arco externo

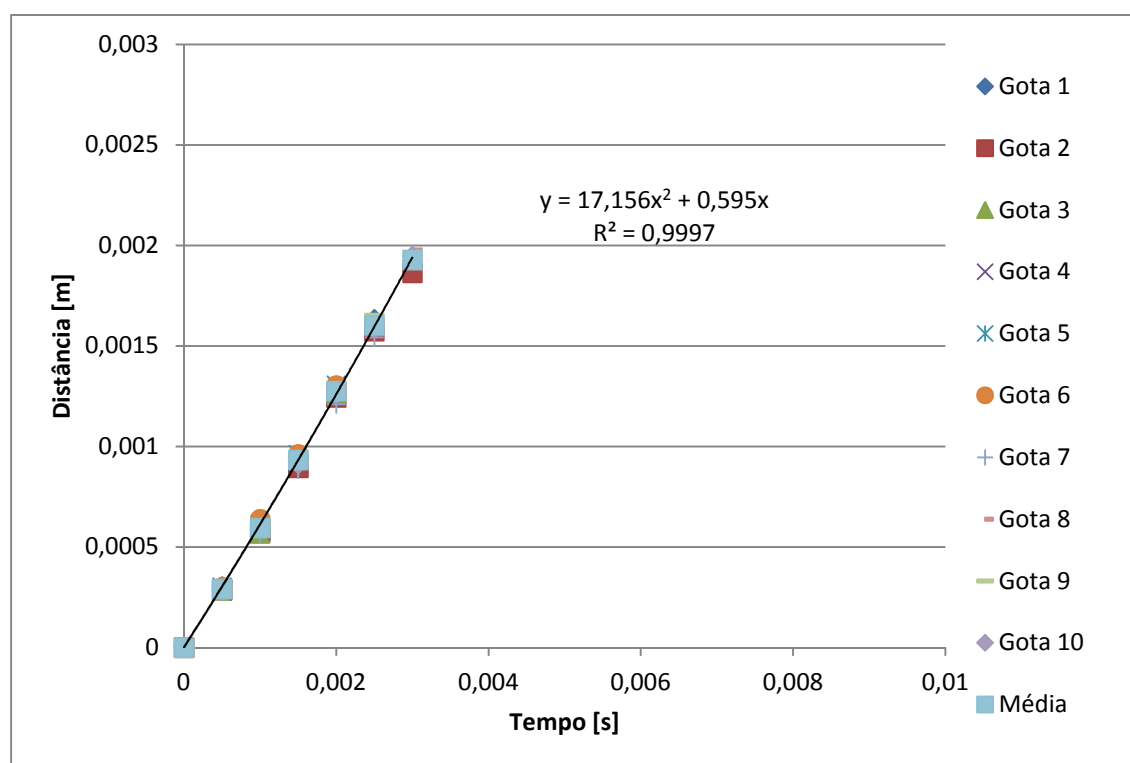


Figura C.10 – Distância percorrida pela gota a partir do destacamento em função do tempo para uma corrente de 230 A no arco interno e de 60 A no arco externo

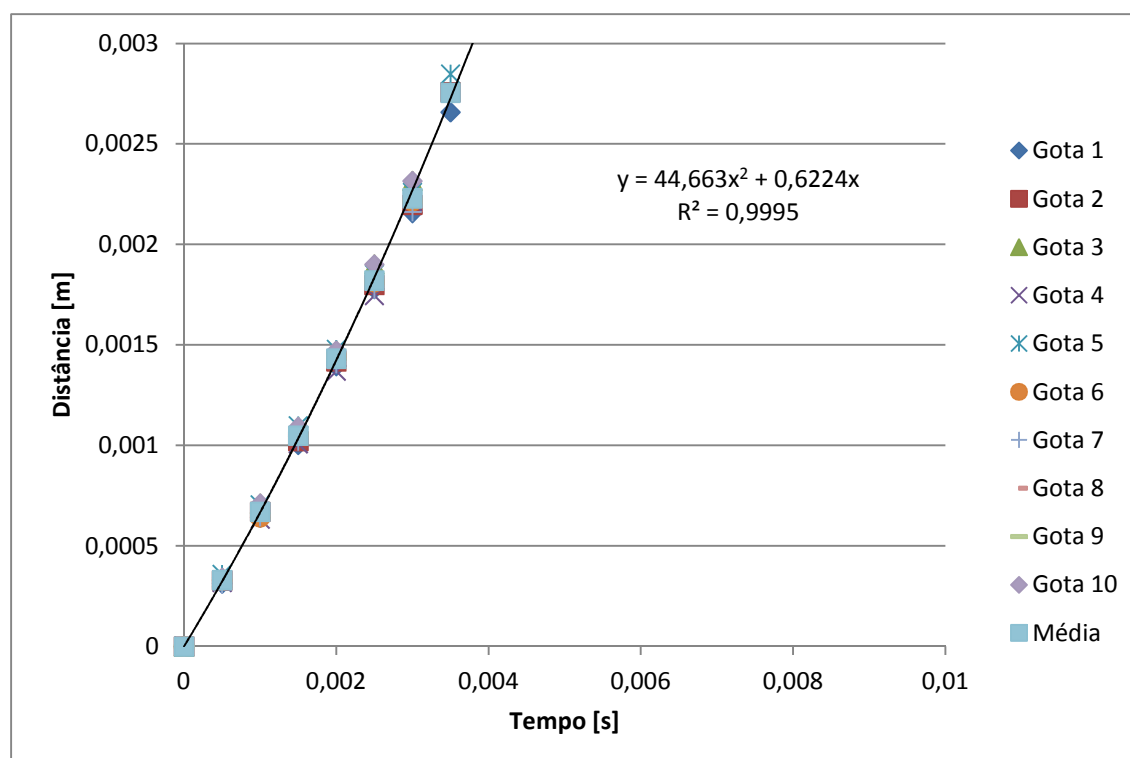


Figura C.11 – Distância percorrida pela gota a partir do destacamento em função do tempo para uma corrente de 240 A no arco interno e de 60 A no arco externo

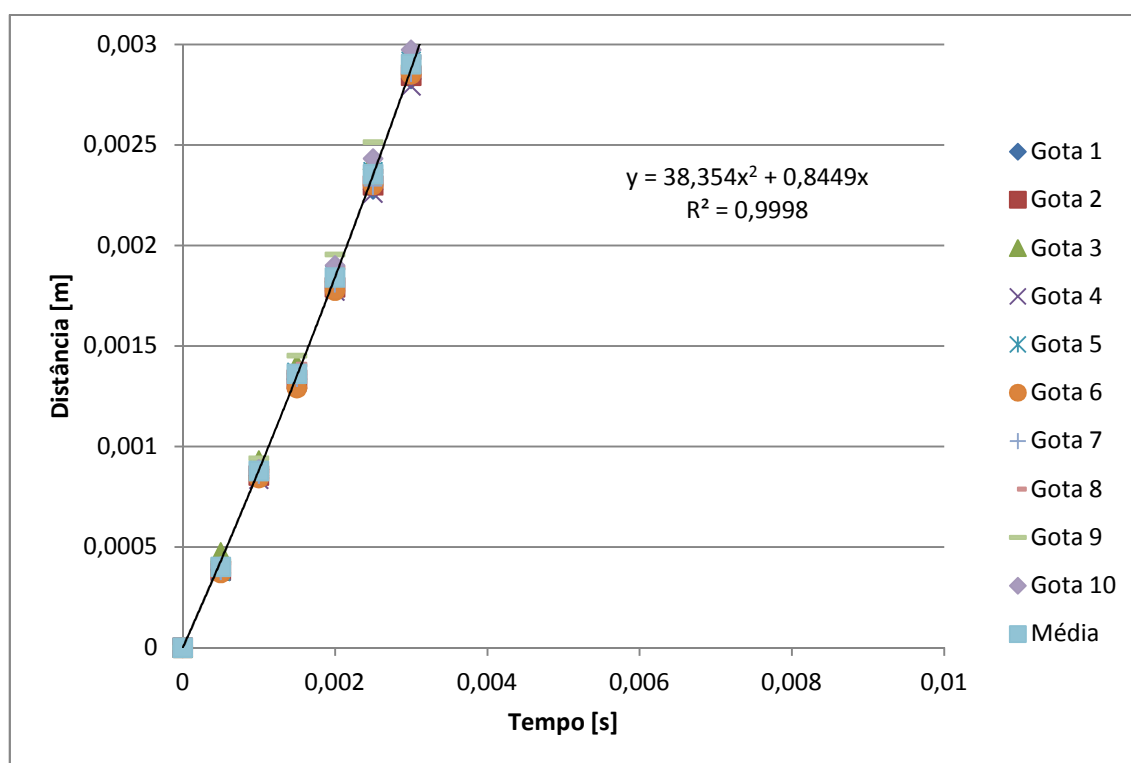


Figura C.12 – Distância percorrida pela gota a partir do destacamento em função do tempo para uma corrente de 250 A no arco interno e de 60 A no arco externo

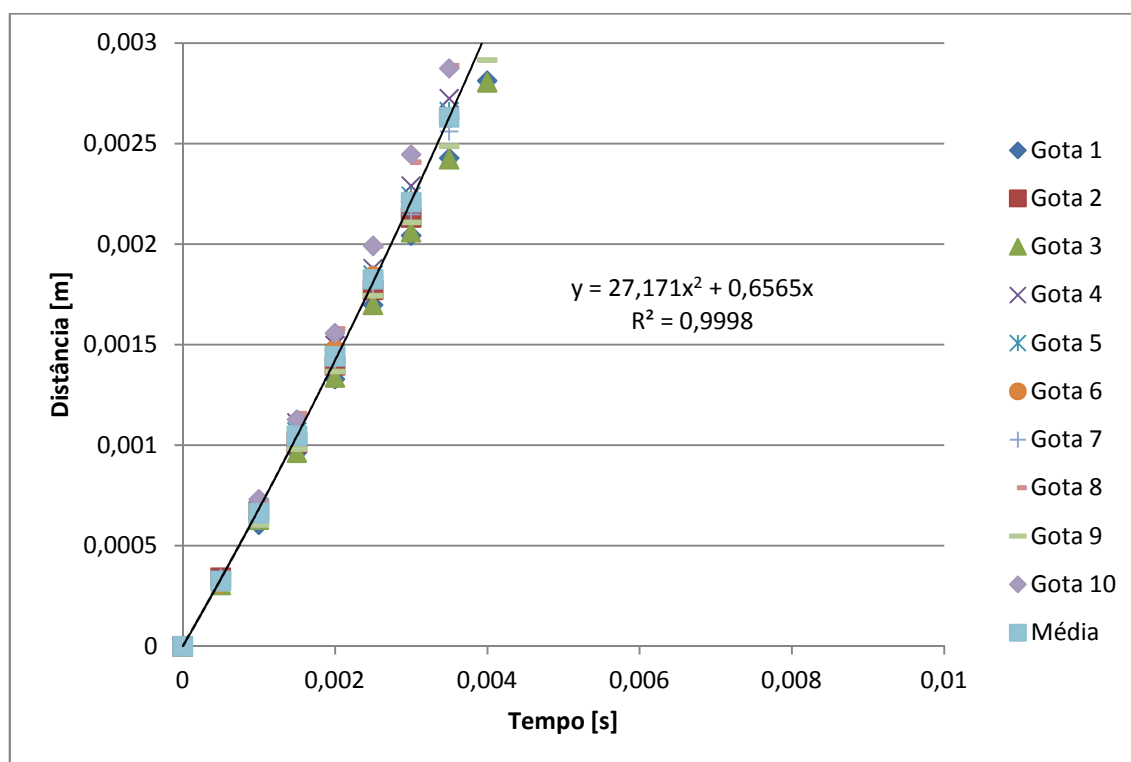


Figura C.13 – Distância percorrida pela gota a partir do destacamento em função do tempo para uma corrente de 230 A no arco interno e de 80 A no arco externo

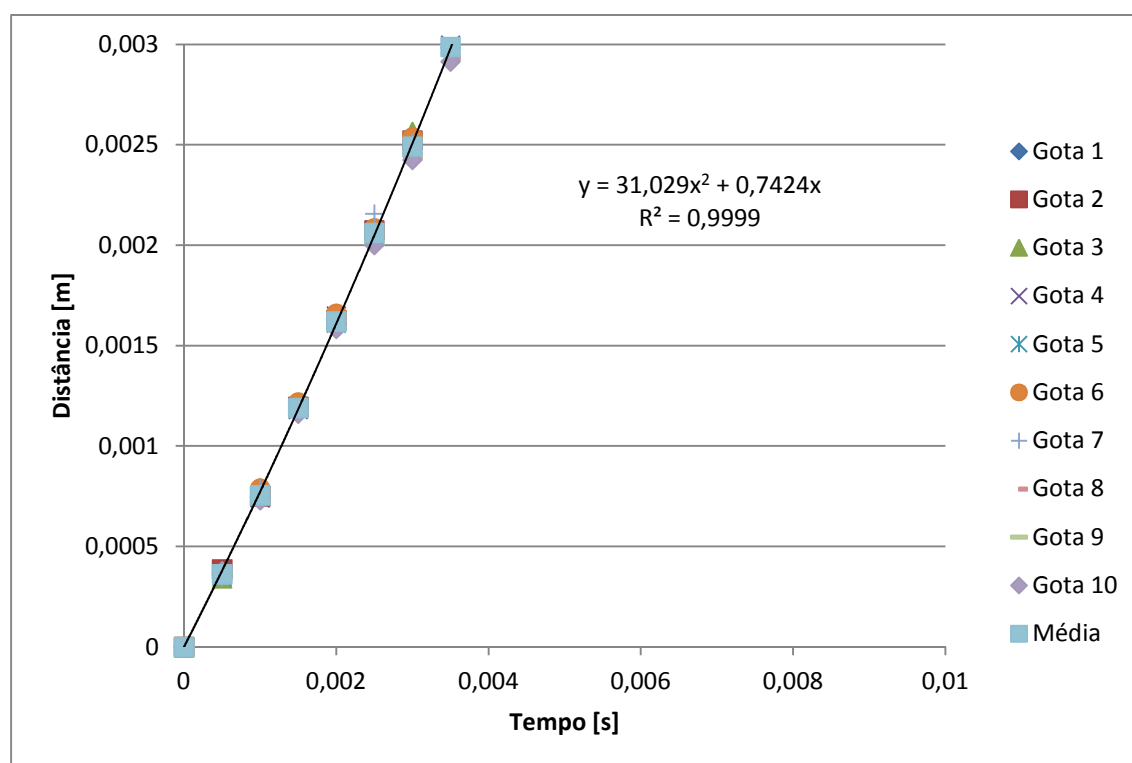


Figura C.14 – Distância percorrida pela gota a partir do destacamento em função do tempo para uma corrente de 240 A no arco interno e de 80 A no arco externo

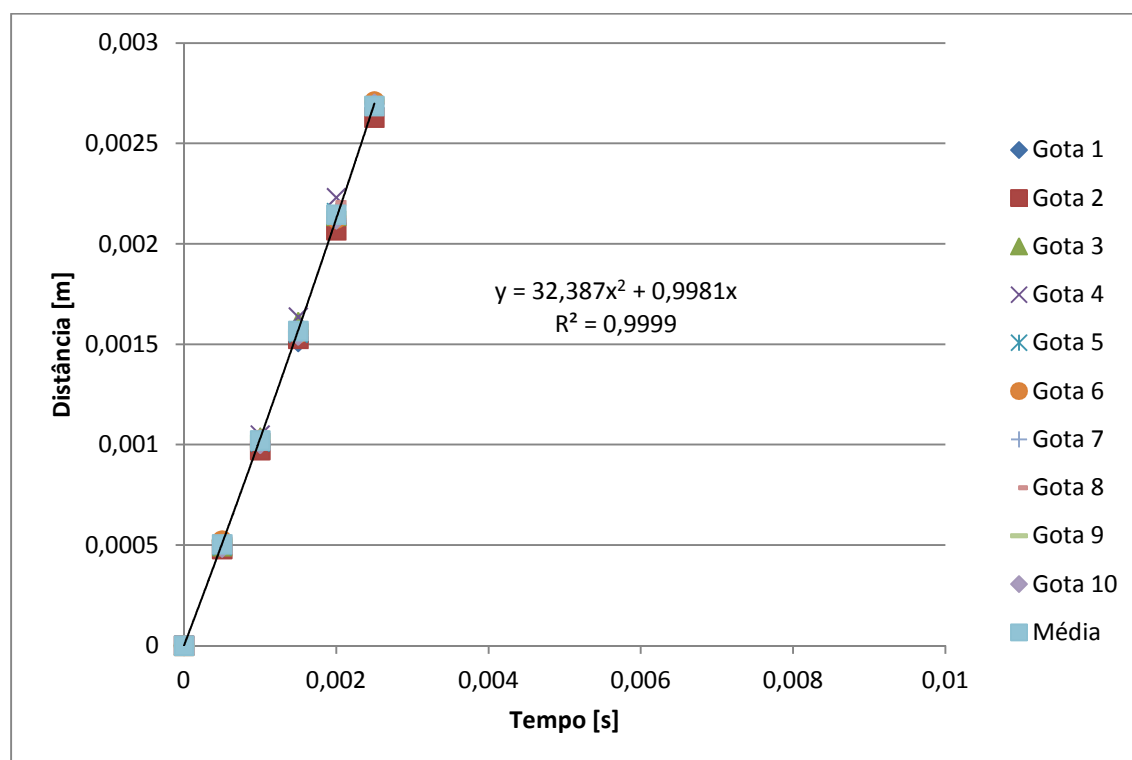


Figura C.15 – Distância percorrida pela gota a partir do destacamento em função do tempo para uma corrente de 250 A no arco interno e de 80 A no arco externo

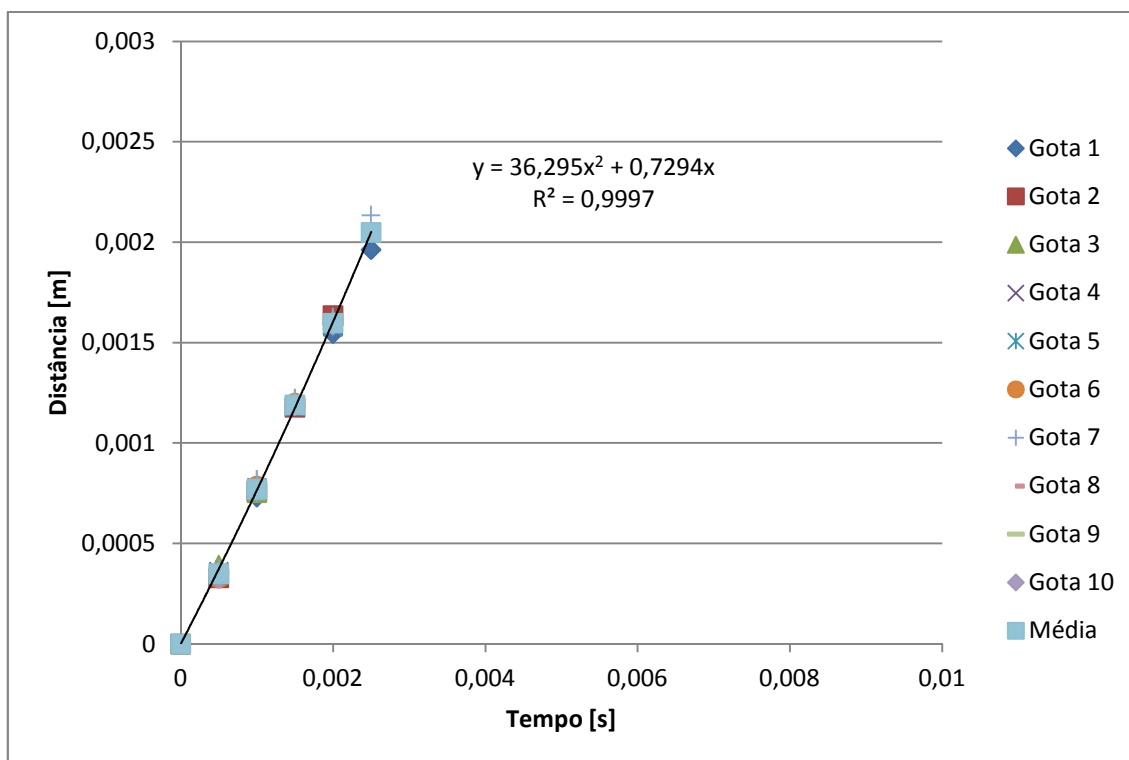


Figura C.16 – Distância percorrida pela gota a partir do destacamento em função do tempo para uma corrente de 250 A no arco interno e de 100 A no arco externo

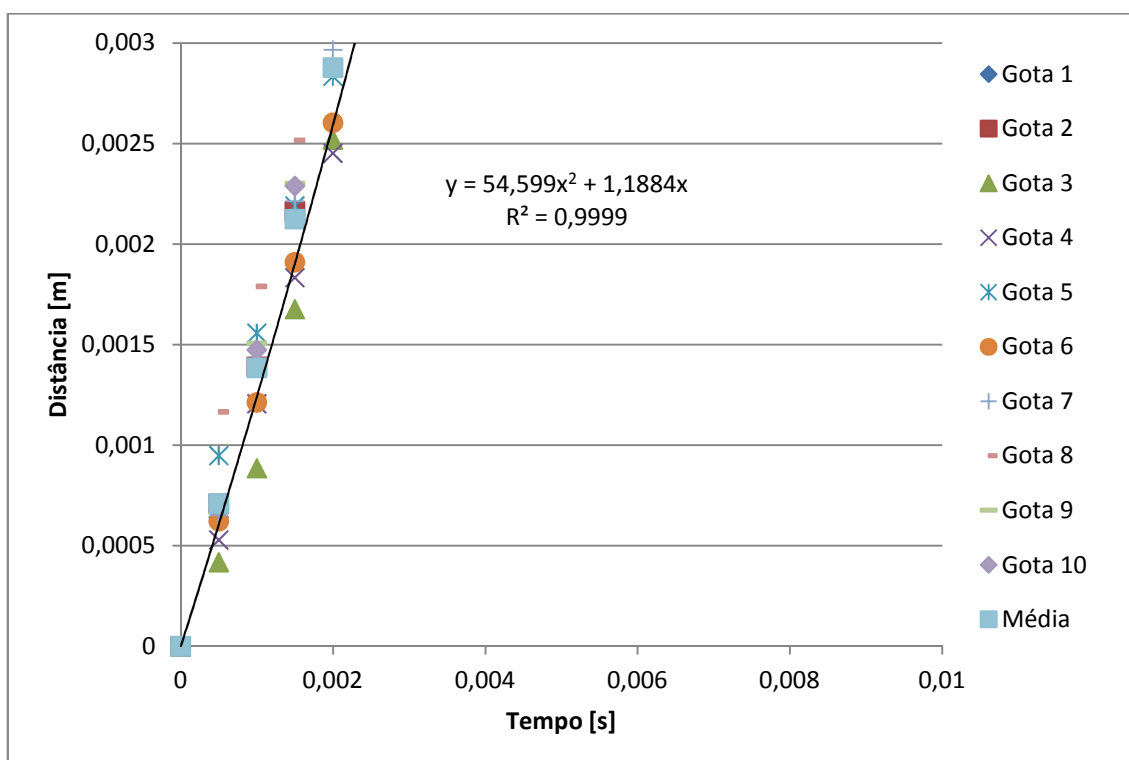


Figura C.17 – Distância percorrida pela gota a partir do destacamento em função do tempo para uma corrente de 270 A no arco interno e de 100 A no arco externo

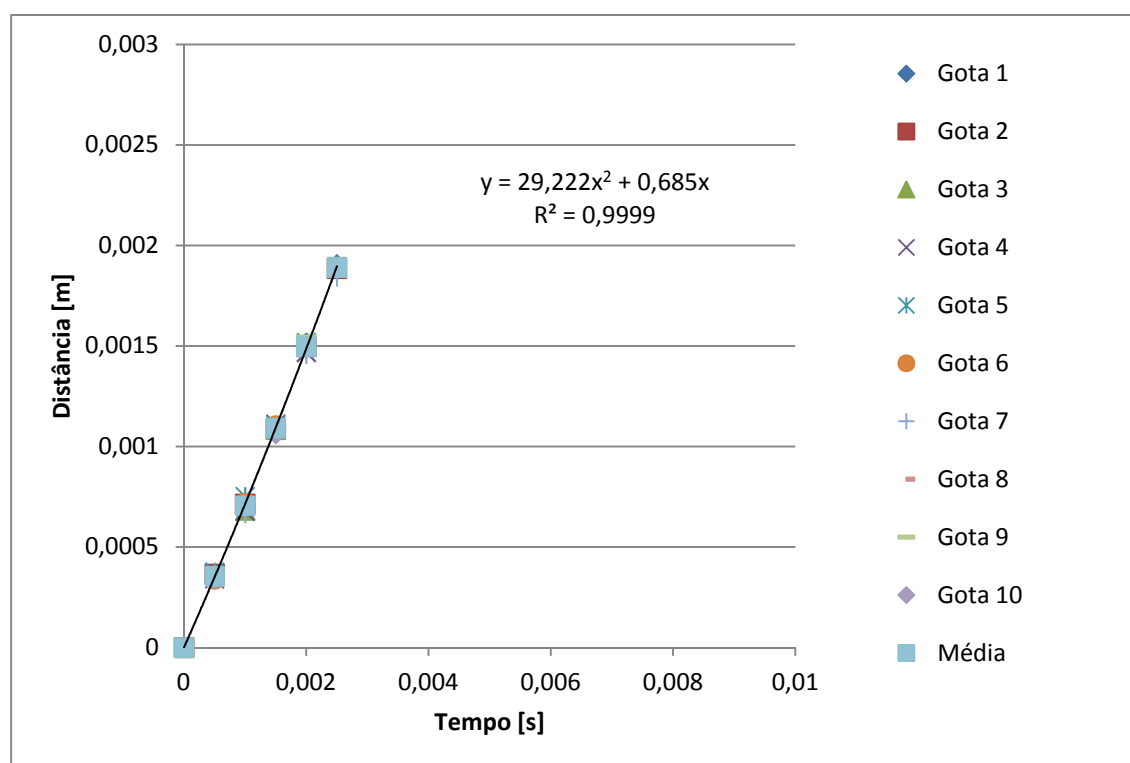


Figura C.18 – Distância percorrida pela gota a partir do destacamento em função do tempo para uma corrente de 240 A no arco interno e de 120 A no arco externo

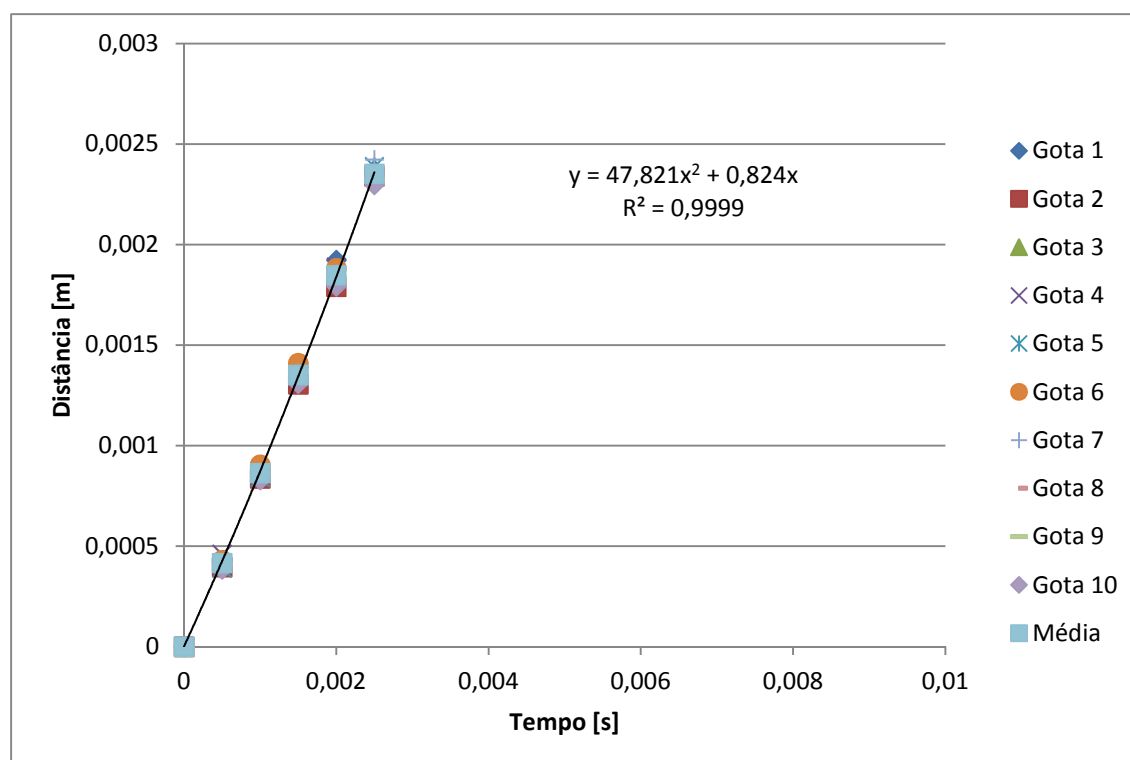


Figura C.19 – Distância percorrida pela gota a partir do destacamento em função do tempo para uma corrente de 250 A no arco interno e de 120 A no arco externo

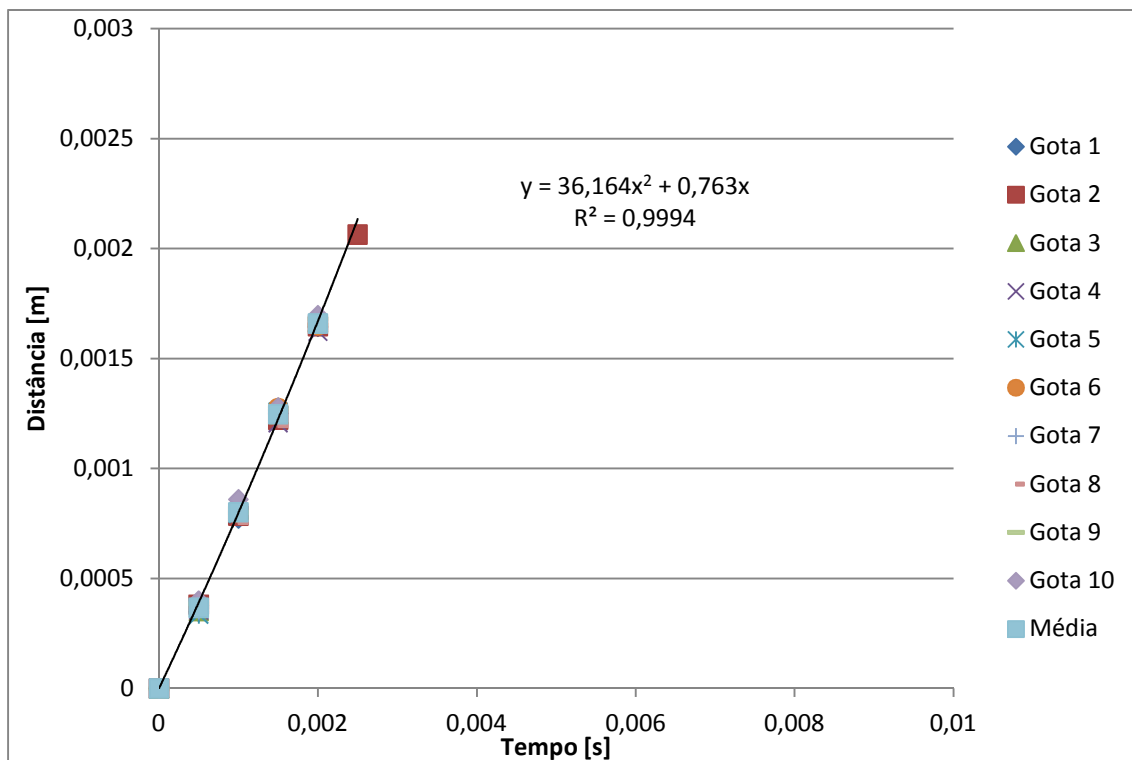


Figura C.20 – Distância percorrida pela gota a partir do destacamento em função do tempo para uma corrente de 260 A no arco interno e de 120 A no arco externo

APÊNDICE D

TABELA DE DADOS USADOS NA GERAÇÃO DOS GRÁFICOS DO CAPÍTULO 5

Tabela D.1 - Frequência de transferência em função das correntes no arco interno e externo

Corrente no Arco Interno [A]	Frequência [gotas/segundo]					
	Corrente no arco externo [A]					
	0	40	60	80	100	120
270	-	-	-	-	178	-
260	-	-	-	177	172	172
250	-	145	156	171	145	150
240	190	117	90	112	-	106
230	138	49	80	81	-	-
220	52	29	-	-	-	-
200	14	-	-	-	-	-
180	7	-	-	-	-	-

Tabela D.2 - Diâmetro de transferência em função das correntes no arco interno e externo

Corrente no Arco Interno [A]	Diâmetro [mm]					
	Corrente no arco externo [A]					
	0	40	60	80	100	120
270	-	-	-	-	1,1	-
260	-	-	-	1,36	1,34	1,37
250	-	1,1	1,31	1,37	1,5	1,42
240	0,92	1,47	1,53	1,51	-	1,6
230	1,18	1,95	1,7	1,7	-	-
220	1,63	2,21	-	-	-	-
200	2,35	-	-	-	-	-
180	3,04	-	-	-	-	-

Tabela D.3 - Velocidade de chegada das gotas em função das correntes no arco interno e externo

Velocidade de chegada [m/s]						
Corrente no Arco Interno [A]	Corrente no arco externo [A]					
	0	40	60	80	100	120
270	-	-	-	-	1,511701	-
260	-	-	-	1,102101	1,198291	1,077401
250	-	1,136721	1,152181	1,230621	1,054867	1,201712
240	1,3061207	1,090825	1,049757	1,023534	-	0,967872
230	1,26876406	0,673065	0,792793	0,930445	-	-
220	0,86783187	0,699127	-	-	-	-
200	0,6788782	-	-	-	-	-
180	0,45864583	-	-	-	-	-

Tabela D.4 - Quantidade de movimento em função das correntes no arco interno e externo

Quantidade de Movimento [Kg.m/s]						
Corrente no Arco Interno [A]	Corrente no arco externo [A]					
	0	40	60	80	100	120
270	-	-	-	-	8,28E-06	-
260	-	-	-	1,14E-05	1,19E-05	1,14E-05
250	-	6,23E-06	1,07E-05	1,3E-05	1,47E-05	1,42E-05
240	4,1857E-06	1,43E-05	1,55E-05	1,45E-05	-	1,63E-05
230	8,5792E-06	2,05E-05	1,6E-05	1,88E-05	-	-
220	1,5467E-05	3,11E-05	-	-	-	-
200	3,6259E-05	-	-	-	-	-
180	5,303E-05	-	-	-	-	-

Tabela D.5 - Força em função das correntes no arco interno e externo

Força [N]						
Corrente no Arco Interno [A]	Corrente no arco externo [A]					
	0	40	60	80	100	120
270	-	-	-	-	0,001474	-
260	-	-	-	0,002016	0,002044	0,001961
250	-	0,000903	0,001663	0,002227	0,002125	0,002124
240	0,000795	0,001668	0,001393	0,001624	-	0,001729
230	0,001184	0,001006	0,001282	0,001524	-	-
220	0,000804	0,000901	-	-	-	-
200	0,000508	-	-	-	-	-
180	0,000371	-	-	-	-	-

Tabela D.6 - Quantidade de movimento efetivo em função das correntes no arco interno e externo

Quantidade de movimento efetivo [Kg.s ⁻¹]						
Corrente no Arco Interno [A]	Corrente no arco externo [A]					
	0	40	60	80	100	120
270	-	-	-	-	0,2457	-
260	-	-	-	0,3455	0,3406	0,3268
250	-	0,1693	0,3024	0,3818	0,3642	0,3641
240	0,190868	0,3337	0,2611	0,2953	-	0,2965
230	0,295983	0,2157	0,2565	0,2857	-	-
220	0,20982	0,2078	-	-	-	-
200	0,152288	-	-	-	-	-
180	0,139203	-	-	-	-	-