



Figura 3.12- Sistema laser/óptico

O princípio da Shadowgrafia aplicado à soldagem é a passagem de um feixe colimado de laser (He-Ne, 632,8 nm) pela região do arco (eletrodo, gotas e poças), de modo que a imagem resultante represente a sombra desses elementos. Para que não haja distorção e ampliação das geometrias dos elementos, é preciso que o feixe tenha um diâmetro suficiente (o aumento do diâmetro do feixe do canhão é conseguido através de uma lente divergente) e que seja realmente paralelo (colimado, conseguido por uma lente convergente em série). Para que a luz do arco não interfira na imagem resultante, é preciso filtrar o feixe de luz após a passagem pela região da solda. Isto é feito através de um filtro passa-banda (para a frequência do laser), ou seja, somente o feixe de laser e as respectivas sombras vão aparecer na imagem. No presente caso, ao invés de projetar-se esta imagem numa tela, a mesma é registrada por uma câmera de vídeo.

3.3.3 - Filtros

Além do filtro passa banda, utilizado para a passagem dos feixes de luz na frequência do laser, ainda foram utilizados um jogo de filtros de densidade neutra, os quais têm a finalidade de atenuar a luminosidade sem cortar frequências. Foram utilizados filtros de densidade neutra da marca Newport, os quais são graduados na escala ND (Neutro Density) em 6 valores, ND01, 03, 05, 10, 20 e 30. No caso de se querer outro valor, eles permitem fazer uma montagem sobrepondo um filtro sobre o outro. Estes filtros podem ser posicionados logo após a saída do feixe do canhão de laser, como pode ser observado na Figura 3.10, ou depois do arco elétrico, através um dispositivo de fixação do filtro na lente acoplado na lente objetiva.

Conforme o número e posição dos filtros, podia-se visualizar ou não o arco junto com a gota em transferência. Quando se quer dar mais ênfase à transferência, deve-se cortar toda a luz do arco. Quando se deseja examinar o comportamento do arco durante as transferências, deve-se deixar passar também a emissão de luz do arco para a câmera. O jogo de filtros que mostrou melhor resultado para a visualização da transferência metálica foi o de ND 10, na lente

objetiva, e o de ND 3 após a saída do feixe do canhão de laser, juntamente com o filtro passa banda. Já para a visualização do arco elétrico foi utilizado somente o filtro de densidade neutra ND 30 na lente objetiva. Nesse caso, não se utiliza o filtro passa banda.

3.3.4 - Acessórios

Foi utilizado um monitor para visualizar imagens que foram capturadas pela câmera de alta velocidade e um Jazz Drive para, posteriormente, gravar digitalmente os filmes.

3.3.5 - Software

Para a visualização e tratamento das imagens gravadas no Jazz Drive, foi utilizado o software “fxLink®”, que possibilita a edição e a conversão das imagens na extensão “tif”.

3.4 - Materiais de Consumo

3.4.1 - Material de Base

O processo MIG/MAG duplo arame normalmente atinge correntes de pelo menos duas vezes o valor para o processo com arame simples. Portanto, teve-se o cuidado de especificar um corpo de prova de dimensões adequadas para suportar a alta carga de energia. O material utilizado em todos os ensaios foi o aço carbono ABNT 1020, na forma de barra chata, com dimensões de 12,7 mm de espessura, 38 mm de largura e 200 mm de comprimento, aproximadamente.

3.4.2 - Material de Adição

O arame-eletrodo utilizado em todos os experimentos é do tipo AWS ER70S-6, ou seja, arame sólido com composição básica de aço comum ao carbono. Foi usado o arame da marca BELGO MINEIRA de diâmetro 1,2 mm.

3.4.3 - Gases de Proteção

Foram utilizadas duas misturas de gases de proteção no trabalho, ambas de Argônio com CO₂ (Dióxido de Carbono). As misturas utilizadas foram a Ar+20%CO₂ (mistura mais rica no teor de CO₂) e Ar+8%CO₂.

3.5 - Metodologia

Inicialmente, para uma maior adaptação e conhecimento do processo e de seus parâmetros, foram feitas diversas soldagens de simples deposição sobre chapa, na posição plana, tentando obter todos os modos de transferência metálica. Como a possibilidade do aumento da velocidade de soldagem é dita como uma das grandes vantagens do processo, principalmente na disposição escolhida para todos os experimentos - em série, tentou-se obter uma maior velocidade de soldagem possível. Porém não se pôde alcançar altas velocidades de soldagem devido à limitações da mesa de soldagem utilizada nos experimentos com filmagem. Portanto, para todos os experimentos foi utilizada uma velocidade de soldagem de 10 mm/s, o que representa quase a velocidade máxima permitida pela mesa de soldagem.

Após a familiarização com o processo e a determinação da velocidade de soldagem adequada foi possível elaborar o procedimento experimental para análise do comportamento da transferência metálica e do perfil soldado para cada variação de parâmetros a ser estudada. As variações propostas para estudo foram:

- comprimento do arco (em três níveis)
- teor de CO_2 do gás de proteção (em dois níveis) para três comprimentos de arco;
- distância entre arames no bico de contato (em dois níveis) para três comprimentos de arco;
- ângulo de ataque (em dois níveis) para um mesmo comprimento de arco;
- velocidade de alimentação de cada arame (iguais nos dois arames; e maior no líder que no escravo em 20%) para um mesmo comprimento de arco;
- velocidades de alimentação de cada arame e ângulo de ataque da tocha conjuntamente (o misto das duas variações anteriores) para um mesmo comprimento de arco.

No estudo de todas as variações, foi adotado o critério de se manter uma mesma corrente de soldagem (I_{ef} média = 280 A), mesmo que para isto houvesse a necessidade de ajustar outros parâmetros de soldagem para a sua correção e conseqüente manutenção. Essa manutenção é muito importante para uma análise dos resultados, pois a corrente está diretamente relacionada com a variação dos modos de transferência e aspectos relacionados a mudanças nos parâmetros geométricos, os quais serão a base da discussão proposta neste trabalho.

É importante chamar a atenção de que se decidiu também, do ponto de vista metodológico, manter a mesma quantidade depositada de arame por unidade de comprimento da solda, independentemente das variações impostas para estudo. Este procedimento visou permitir uma melhor comparação de cada variação sobre a geometria do cordão. Para tal,

fixou-se que os dois arames juntos deveriam depositar 22 m/min, o que equivale a uma taxa de fusão de 11,7 kg/h.

Em cada condição de soldagem selecionada para se fazer o estudo da influência das variações acima listadas, soldou-se dois corpos de prova, no intuito de filmar a transferência metálica separadamente sem a presença do arco elétrico e com o arco, visualização possível nesta técnica, pelo ajuste de filtros. Foi feita a aquisição do sinal de corrente e tensão para se obter os valores médios e eficazes (rms) dos mesmos e, portanto, entre outras coisas, comprovar a semelhança entre faixas de corrente.

Para todos os experimentos, além de adquiridos os sinais de tensão e corrente em ambas as fontes, foi proposto analisar e discutir as características das transferências metálicas obtidas e as conseqüências dos efeitos das variáveis sob estudo sobre essa transferência e sobre a geometria dos cordões.

Desta forma, os corpos de prova (CP) após a soldagem foram seccionados para observar a geometria do cordão. O critério utilizado para a posição do corte foi o de fazê-lo logo antes da última porção da poça de fusão solidificada, quando se acredita que a transferência metálica estivesse mais estável (ver Figura 3.13).



Figura 3.13 – Posição de corte das amostras no corpo de Prova

Cada amostra foi lixada em suas duas seções transversais, em lixas de granulações 220, 320, 600 e 1000 e, em seguida, atacada quimicamente com NITAL 4%, para a revelação da zona fundida e uma posterior medição dos parâmetros geométricos (largura, penetração, área total fundida e área adicionada), esquematizados pela Figura 3.14.

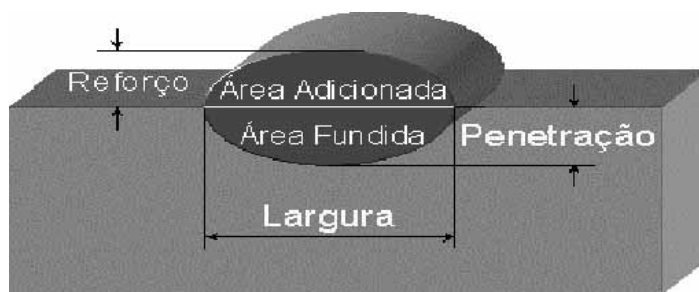


Figura 3.14 – Parâmetros geométricos

Para a aquisição de fotos digitais dos perfis soldados e, conseqüentemente, dos parâmetros geométricos, fez-se necessário a utilização de um equipamento de aquisição digital de imagens (Figura 3.15) composto por uma câmera CD e lentes, o conjunto conectado a um computador, e softwares comerciais: *GLOBAL Lab Acquire*® (aquisição), *Adobe Photoshop*® (tratamento das imagens) e *GLOBAL Lab Image*® (obtenção dos parâmetros geométricos) (Silva, 1995).



Figura 3.15 – Sistema de obtenção e tratamento de imagens

Já os filmes obtidos em cada experimento foram analisados previamente no intuito de observar o tipo de transferência metálica e a qualidade do vídeo. Posteriormente, para que se pudesse demonstrar o comportamento da transferência em cada situação, fez-se a transformação dos filmes em seqüências de fotos através do software *fxlink*®. Como a freqüência de aquisição é muito alta (2000 fotos por segundo), seria necessário um número de fotos muito grande para se preservar esta taxa de aquisição. Portanto, para cada experimento, foram utilizadas amostras seqüenciais com os tempos entre quadros, não necessariamente constantes que melhor representassem cada tipo de transferência. Deve-se lembrar ainda que, em todos os vídeos, o arame líder está à esquerda.

3.5.1 - Variação do comprimento de arco em um mesmo nível de corrente

A necessidade de variar-se o comprimento do arco para uma mesma corrente se deu para satisfazer inicialmente o interesse em verificar a influência desta variável no comportamento da transferência e sua conseqüência sobre a formação geométrica do cordão. Entretanto, como se verá ao longo deste trabalho, passou a ser mais do que uma das variáveis a ser estudada, uma vez que mesmo ao se estudar o efeito das outras variações listadas, fazia-se necessário avaliar outros comprimentos de arcos compatíveis com a nova condição, e sempre com o mesmo nível de corrente.

Para se obter comprimentos de arcos diferentes em uma mesma faixa de corrente e

velocidades de alimentação em fontes convencionais (característica estática do tipo tensão constante), utilizou-se o artifício de variar a Distância do Bico de Contato-Peça (DBCP). Quando, por exemplo, se aumenta a DBCP, mantendo-se todos os outros parâmetros constantes (inclusive Velocidade de Alimentação – Valim), há uma diminuição do valor da corrente, pois há um aumento do comprimento energizado do eletrodo, apesar do comprimento do arco ficar praticamente o mesmo. O aumento do comprimento energizado do eletrodo ocasiona um aumento da resistência elétrica que, por efeito joule, aumenta a energia em forma de calor para o arame, diminuindo assim a corrente demandada para manter a mesma taxa de fusão (mesma Valim). Em seguida, aumenta-se a regulação da tensão até que a corrente retorne para o valor desejado. Já este aumento da tensão para uma dada corrente e DBCP, significa o aumento desejado de comprimento do arco.

Os dados da Tabela 3.2 ilustram a aplicação do procedimento acima descrito para se obter diferentes comprimentos de arco. Como se vê, pôde-se obter três níveis de comprimento de arco, pequeno, médio e longo, numa série de soldas de simples deposição sobre chapa, mantendo-se a Valim em cada alimentador no valor de 11 m/min (taxa de fusão total de 11,7 kg/h) e fixando-se a DBCP em três valores, 16, 20 e 24 mm. Como se partia da premissa de trabalhar em mesmas faixas de corrente, tomou-se como base a corrente do experimento t1 para, então, ajustar os valores das outras duas condições de tamanho de arco proposto. As tensões de regulação encontradas para a correção dos valores das correntes dos experimentos t2 e t3 foram 30,5 e 32,8 V, respectivamente, obtidas através dos experimentos t4 e t5, como pode ser observado na Tabela 3.2.

Tabela 3.2 – Obtenção de tensões de correção para a variação de DBCP, utilizando-se a tocha DAPU e a proteção por Ar+8%CO₂

Corpo de Prova (CP)	Parâmetros Ajustados			Parâmetros Obtidos			
	U (V)	DBCP (mm)	Valim líder/guido (m/min)	I _{ef} Mestre (A)	I _{ef} Esc (A)	U _{ef} Mestre (V)	U _{ef} Esc (V)
t1	24	16	11/11	271	274	24,5	24,3
t2	24	20	11/11	253	256	24,3	23,5
t3	24	24	11/11	237	240	24,6	24,4
t4	30,5	20	11/11	274	277	30,4	28,9
t5	32,8	24	11/11	277	280	32,6	30,9

Ainda com base na Tabela 3.2, observa-se que a corrente do eletrodo da fonte escrava é levemente superior em todos os experimentos, o que pode ser explicado pelo menor comprimento real do arco nesse arame em relação ao líder, tanto pela formação prévia da poça pelo arame da mestra (Figura 3.16), como por um fenômeno observado também por Motta et al

(2004); o arco da frente é sempre mais deslocado pelo efeito do campo magnético⁵. Em relação aos valores de tensão, nota-se que eles seguiram a regulação da tensão na fonte, considerando erros aleatórios devidos à própria resolução do sistema de medida e à dinâmica da fonte frente a transientes.

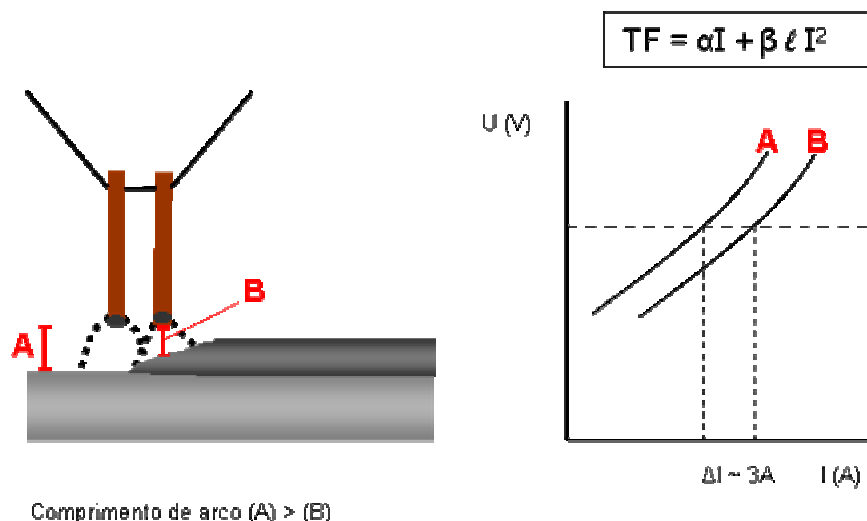


Figura 3.16 – Representação do efeito da deposição do arame líder sobre a variação do comprimento do arco

3.5.2 - Variação do teor de CO₂ do gás de proteção em um mesmo nível de corrente

Para análise do comportamento da transferência metálica e do perfil soldado sob a variação do teor de CO₂ no gás de proteção, foram utilizados dois tipos diferentes de misturas de gases, como foi citado no item 3.4.3, a saber, Ar+20%CO₂ e Ar+8%CO₂.

Como citado na revisão bibliográfica, do aumento do teor de CO₂ é esperado, para um mesmo ajuste de parâmetros, uma diminuição no valor de corrente devido às suas propriedades físicas. Portanto, foi proposta a utilização do mesmo procedimento utilizado para correção da corrente quando da obtenção de comprimentos de arcos diferentes, ou seja, variou-se a DBCP e a regulação de tensão até que a corrente do processo protegido com Ar+20%CO₂ se assemelhasse com a corrente anteriormente obtida com a proteção por Ar+8%CO₂.

Entretanto, a garantia de uma mesma corrente não era a garantia de um mesmo comprimento de arco. E não se pode comparar efeitos de uma variável sobre a transferência

⁵ - Ensaios mais recentes sugerem que o fato de o arco da frente ser sempre atraído pelo arco de trás parece depender da velocidade de soldagem. Em velocidades maiores, o fenômeno pode ocorrer ao contrário.

metálica se o arcos forem de diferentes tamanhos, mesmo que no mesmo nível de corrente. Por isto, foi procurado variar também o comprimento do arco da soldagem com $\text{Ar}+20\%\text{CO}_2$, ainda da mesma maneira de que no item 3.5.1, em três níveis, de tal forma que os resultados pudessem ser comparados de um modo mais coerente com os resultados com a proteção com $\text{Ar}+8\%\text{CO}_2$ obtidos pelo procedimento do item anterior. Nesta fase do trabalho, foram mantidos constantes os demais parâmetros, inclusive a distância entre eletrodos = 4 mm - tocha DAPU, em detrimento da variação dos dois tipos de gases citados no primeiro parágrafo deste item.

3.5.3 - Variação da distância entre arames-eletrodo no bico de contato em um mesmo nível de corrente

Com o objetivo de analisar a influência da distância entre eletrodos sobre a transferência metálica e perfil soldado, utilizou-se as duas tochas apresentadas no item 3.1.2, que, apesar de manterem-se de forma semelhante os arames paralelos na saída do bico de contato, diferenciam-se por possuir espaçamentos diferentes entre as pontas dos arames (4 mm para a tocha potencial único – DAPU – e de 10 mm para a tocha de potencial isolado – DAPI). Ao se utilizar as tochas para sistemas diferentes, outra diferença operacional se sobressai, isto é, o próprio tipo de ajuste da fonte permite com a DAPI regular separadamente o parâmetro de soldagem de cada arame.

Desta forma, para minimizar o efeito desta segunda diferença operacional, ajustou-se, quando do uso da tocha DAPI, os mesmos parâmetros de tensão de soldagem nas duas fontes, valor de tensão este ajustado nos experimentos planejados no item 3.5.1, com a tocha DAPU, na qual a tensão é ajustada somente na fonte Mestre, a qual comanda a fonte escrava.

Houve ainda a necessidade de se utilizar vazões diferentes para as duas tochas, isso porque a tocha DAPI possui um diâmetro com quase o dobro da área de bocal em relação à tocha DAPU (diâmetro foi medido). Desta forma, foi utilizada uma vazão de 20 l/min na tocha DAPU e de 40 l/min na tocha DAPI (dois cilindros ligados em paralelo).

Nesta fase do trabalho, foi utilizada a tocha DAPI e a proteção por $\text{Ar}+8\%\text{CO}_2$. Foi procurado variar também o comprimento do arco da soldagem, conforme procedimento do item 3.5.1, em três níveis, de tal forma que os resultados pudessem ser comparados de modo mais coerente com os resultados com o uso da tocha DAPU, cuja distância entre as pontas de arames era menor. Um outro nível mais elevado de comprimento do arco foi testado ($U= 37,6$ V) com o objetivo de analisar a tendência de extrapolação das curvas obtidas com os outros comprimentos de arco.

3.5.4 - Variação do ângulo de ataque em um mesmo nível de corrente

Dependendo do ângulo e sentido de soldagem (empurrando ou puxando) imposto, pode-se encontrar melhores resultados e acabamento do cordão de solda. Espera-se que o sentido de soldagem puxando, favoreça a penetração, enquanto sentido empurrando melhore o acabamento do cordão soldado, ocasionando cordões com maiores larguras e menos convexos.

Desta forma, neste experimento usou-se a tocha DAPU, variando-se o ângulo de ataque em 10° empurrando de modo a comparar com a situação onde não havia ângulo de ataque. Na Figura 3.17 pode-se observar a configuração proposta.

Novamente, a situação do comprimento de arco longo do item 3.5.1 mostrou-se mais adequada para comparação pois, como já foi dito anteriormente, mostrou-se ser a condição de maior estabilidade e, segundo alguns autores (Hedegard et al, 2004, Diltthey et al, 1998 e Mulligan & Melton, 2004) arcos curtos não são recomendados para o processo duplo arame, pois causam muita instabilidade do arco elétrico.

Da mesma maneira que para a mudança de gás de proteção teve-se que encontrar uma tensão de ajuste para compensar a variação do ângulo de ataque da tocha de 10° , já que essa mudança ocasiona um desvio da DBCP nos dois arames e uma conseqüente diminuição da corrente. A tensão encontrada após algumas soldagens experimentais foi de 35,6 V, o que elevou a corrente a níveis desejados para a comparação com a situação proposta. Nessas soldagens o gás de proteção foi de Ar+8%CO₂.

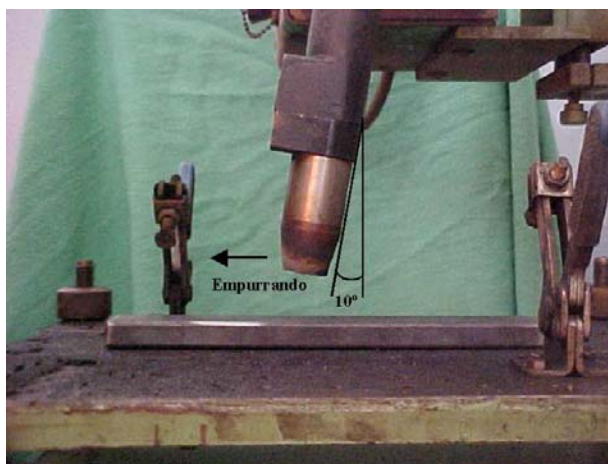


Figura 3.17 – Configuração da tocha angulada de 10° empurrando

3.5.5 - Variação da velocidade de alimentação de cada arame em um mesmo nível de corrente

Segundo boa parte da literatura, recomenda-se diferentes velocidades de alimentação para os arames líder e guiado, com a velocidade do cabeçote escravo entre 60 a 100% da do líder (Mulligan et al, 2002). Para poder comparar com os resultados obtidos para diferentes comprimentos de arco e com as mesmas taxas de fusão (item 3.5.1), teve-se o cuidado, nesta fase, de se manter a soma das duas velocidades de alimentação igual a 22 m /min. Para tanto foi testado alguns pares de velocidades, porém muitos deles apresentaram uma grande instabilidade, apresentando uma transferência com muitas explosões e respingos. Dentre os pares com diferentes velocidades de alimentação, a condição de 12 m/min no arame líder e 10 m/min no guiado foi a que demonstrou maior estabilidade dentre a série de soldagens feitas anteriormente às filmagens. A diferença entre as velocidades do arame guiado e líder ficou em 83%, o que está dentro da faixa indicada pela literatura.

Para comparação, foi utilizada a situação do comprimento de arco longo do item 3.5.1, por motivos já citados anteriormente. Nesta fase do trabalho, foi utilizada a tocha DAPU e a proteção por Ar+8%CO₂.

3.5.6 - Variação conjunta da velocidade de alimentação de cada arame e do ângulo de ataque em um mesmo nível de corrente

A variação conjunta das velocidades de alimentação nos dois arames e do ângulo de ataque, ao mesmo tempo, foi uma variação proposta para se avaliar as possíveis melhorias no perfil soldado, uma vez que as duas alterações separadamente são citadas como benéficas.

Para tanto, foram mantidos os parâmetros ajustados nos itens 3.5.4 e 3.5.5, com velocidades de 12 m/min no arame Líder e 10 m/min no guiado e tocha inclinada de 10° (empurrando), para comparar com a situação do comprimento de arco longo do item 3.5.1.

Nesta fase do trabalho, foi utilizada a tocha DAPU e a proteção por Ar+8%CO₂.

Capítulo IV - Resultados e Discussão

Para uma melhor análise da influência da mudança das variáveis propostas, este capítulo será dividido em duas partes, a saber, análise da transferência metálica e análise do perfil soldado.

4.1 - Análise da transferência metálica

4.1.1 - Transferência metálica para diferentes comprimentos de arco

Como foi citado no procedimento experimental, item 3.5.1, para obter-se três comprimentos de arco com distância entre eletrodos de 4 mm, foi utilizado o artifício de variar a DPBC em três níveis; e para corrigir-se o valor da corrente, ajustou-se a tensão na fonte. Após obter as tensões de ajuste, fez-se dois cordões de solda para cada comprimento de arco, desta vez, filmando a transferência metálica juntamente com a aquisição dos sinais de tensão e corrente.

De acordo com a Tabela 4.1, pode-se observar os valores médios e eficazes das correntes e tensões, tanto da fonte escrava (Esc.), como da fonte mestra. Pode-se observar também que somente na repetição da condição de arco médio (CP 3 e 4) não houve boa repetibilidade, justificado-a por uma combinação de parâmetros de transição entre transferência curto-circuito e goticular. A média calculada entre as correntes eficazes dos três comprimentos de arco, tanto da fonte mestre quanto da escrava, foi de 282 A com 9 A (~3%) de desvio padrão, fato que comprova o sucesso relativo da tentativa de trabalhar-se com uma mesma corrente média (280 A).

Tabela 4.1 – Parâmetros ajustados e monitorados nos experimentos com variação do comprimento do arco e Ar+8%CO₂ (Valim líder = Valim guiado = 11 m/min)

Corpo de Prova (CP)	Parâmetros Ajustados		Parâmetros Obtidos							
	Tensão na Fonte	DBCP (mm)	I _{ef} Mestre	I _{ef} Esc.	I _m Mestre	I _m Esc.	U _{ef} Mestre	U _{ef} Esc.	U _m Mestre	U _m Esc.
1	24	16	275	278	270	272	24,3	24,4	23,8	24,3
2	24	16	278	281	272	274	24,2	24,3	23,7	24,1
3	30,5	20	294	297	294	297	30,3	29,3	30,3	29,3
4	30,5	20	267	270	262	265	30,5	29,8	30,2	29,7
5	32,8	24	284	288	284	287	32,7	31,5	32,7	31,5
6	32,8	24	282	286	282	285	32,7	31,2	32,6	31,2

Uma técnica utilizada para avaliar o modo de transferência metálica quando não se tem a filmagem em alta velocidade é comparar os valores médios com os eficazes da corrente e da tensão. Quando eles têm valores bem próximos, caso dos CP 3, 5 e 6, pode-se supor uma transferência goticular (“spray”), devido à menor oscilação de amplitudes dos sinais de corrente e tensão, caracterizando uma estabilidade na transferência. Os oscilogramas de corrente e tensão da transferência por curto-circuito se caracterizam por transientes e os respectivos valores médios e eficazes distanciam-se, caso dos CP 1, 2 e 4. No Anexo V são colocados os oscilogramas típicos referentes aos experimentos.

Para se ter uma certeza sobre o tipo de transferência metálica ocorrida em cada comprimento de arco foi feita a filmagem em alta velocidade, que proporcionou além da visualização do tipo de transferência metálica, a observação da interação entre os arcos elétricos, principalmente nas situações de arco médio e longo. A literatura corrente, por exemplo, Diltthey et al (1998) e Mulligan & Melton (2002), condena em muitos casos a utilização do processo com potencial único em MIG/MAG duplo arame devido a esta interação eletromagnética entre dois arcos. Na Figura 4.1 e confirmado pelos oscilogramas, pode-se observar a transferência do arco mais curto, com a DBCP de 16 mm. Nela, verifica-se uma transferência por curto-circuito, com o arame líder enterrado em sua maior parte e o guiado em curto-circuito com explosões constantes, ocasionando uma quantidade considerada de respingos. Não se observa grande interação dos arcos.

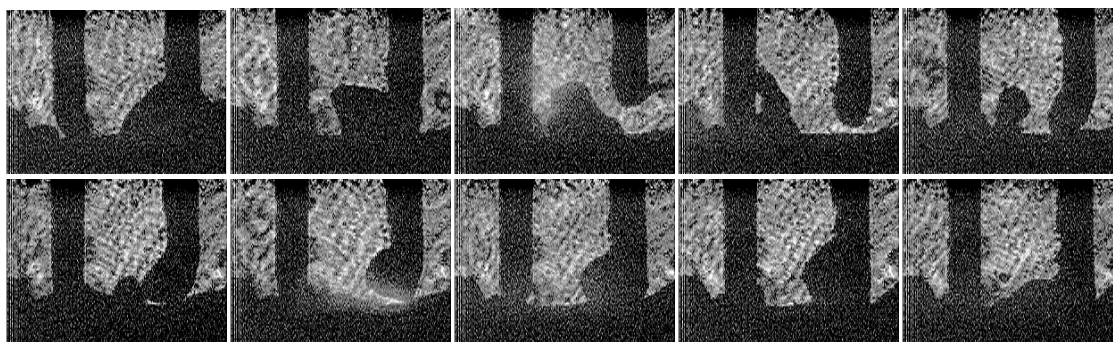


Figura 4.1 – Amostra seqüencial (tempo entre quadros não necessariamente constantes) que melhor ilustra a transferência metálica com arco curto, com Ar + 8% de CO₂ e distância entre eletrodos de 4 mm (arco da mestra à esquerda) , CP 1 e 2

A transferência com comprimento de arco resultante da DBCP de 20 mm demonstrou-se inconsistente, ora por curto-circuito ora goticular. Já há uma tendência de interação entre os arcos, avaliado pela atração entre as gotas. Podem-se destacar alguns comportamentos diferenciados neste experimento. Um primeiro (Figura 4.2) caracterizava-se quando o arame da mestra alterna o tipo de transferência, algumas vezes goticular com alongamento e na

seqüência passa ao curto-circuito enterrado. A transferência do arame guiado se comportou na maior parte do tempo, como curto-circuito.

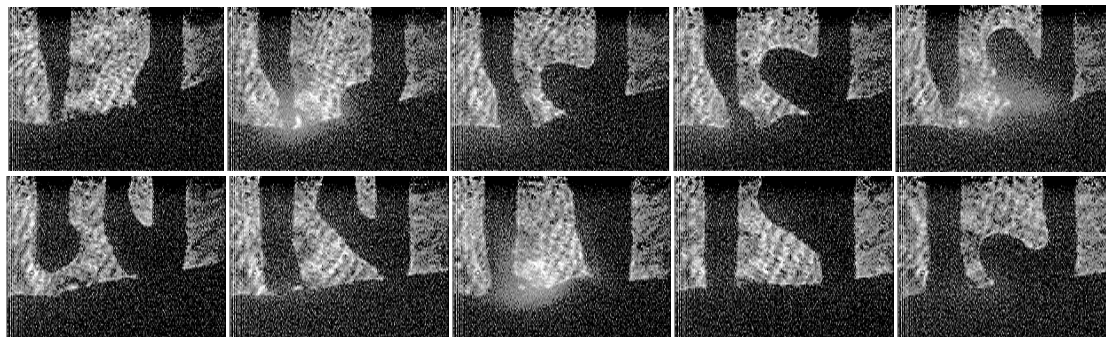


Figura 4.2 – Amostra seqüencial da transferência metálica com arco médio, com Ar + 8% de CO₂ e distância entre eletrodos de 4 mm - comportamento 1, CP 3 e 4

Um segundo comportamento é ilustrado pela Figura 4.3, quando os dois arames aparentemente estavam transferindo a gota por curto-circuito, com gotas com o diâmetro maior que o arame-eletrodo. Essas gotas, em certos momentos, foram grandes o suficiente para unirem-se numa só, formando uma única gota de maior tamanho entre os dois eletrodos e, posteriormente, explodindo com um curto-circuito. Ambos os comportamentos dos arcos demonstraram instabilidade. Os oscilogramas (Anexo V) confirmam haver curtos-circuitos.

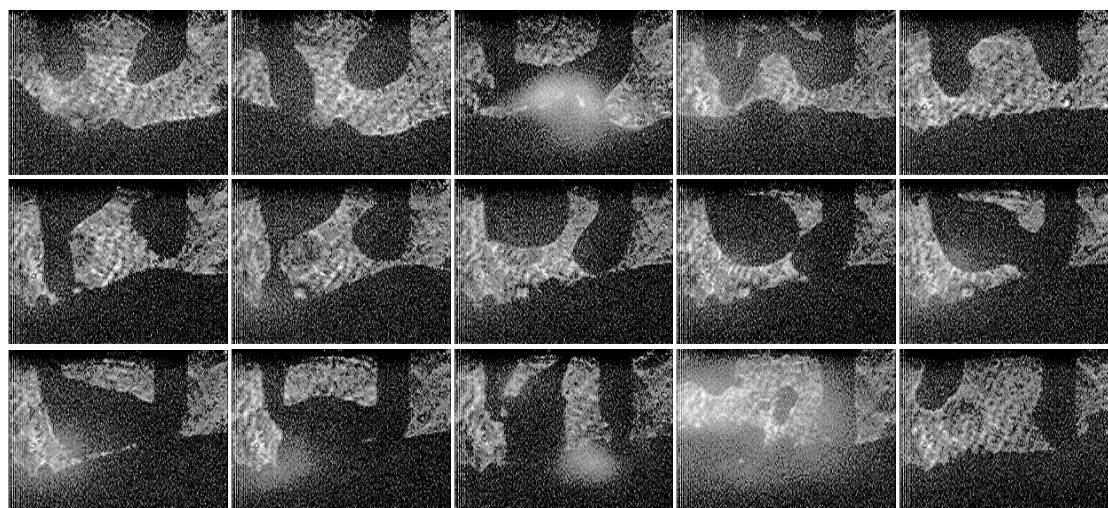


Figura 4.3 - Amostra seqüencial da transferência metálica com arco médio, com Ar + 8% de CO₂ e distância entre eletrodos de 4 mm - comportamento 2, CP 3 e 4

Estes resultados estão em concordância com os de outro autor. Segundo Gonzáles (1999), uma característica observada através de filmagens da soldagem por curto-circuito de 2 arames na disposição em série, o eletrodo da frente (alimentado pela fonte mestre) transfere gotas de metal fundido com uma frequência mais baixa em relação ao de trás e com características de transferência globular. No segundo eletrodo (alimentado pela fonte escrava),

os curtos se dão com maior frequência e a transferência é dada efetivamente por curto-circuito. Desta forma, talvez seja possível otimizar o ajuste dos parâmetros fazendo regulagens diferenciadas entre as velocidades de alimentação de cada arame (por exemplo, maior velocidade para o arame da fonte mestre), obtendo-se individualmente a transferência adequada.

Na Figura 4.4, pode-se observar a transferência metálica do arco de maior comprimento, com DBCP de 24 mm. Esta transferência se dá no modo goticular em ambos arames (goticular com alongamento), ocasionando uma transferência estável e uniforme ao longo do cordão de solda, com pouca quantidade de respingos. Não há evidência de transferência por curto-circuito nos oscilogramas, mesmo que em alguns quadros da imagem (por exemplo, os dois últimos quadros da Figura 4.4) possa parecer o contrário (os possíveis curtos são incidentais, ou seja, muito rápidos e nos quais não há tempo para esta transferência durante os curtos).

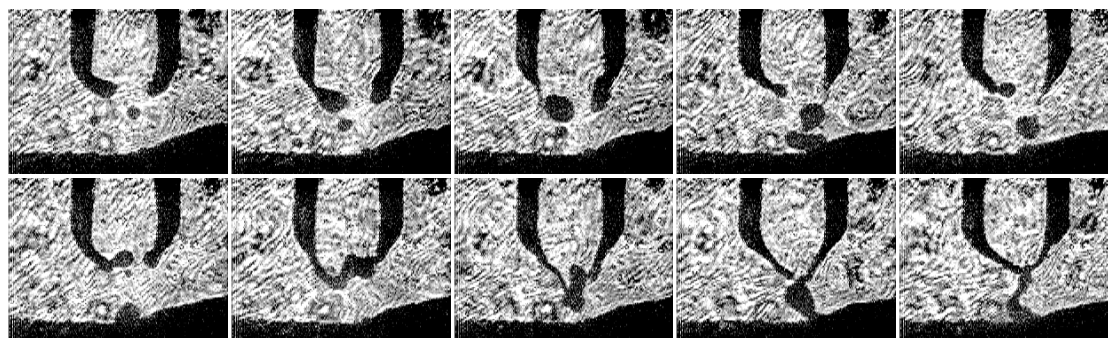


Figura 4.4 – Amostra seqüencial da transferência metálica com arco longo, com Ar + 8% de CO₂ e distância entre eletrodos de 4 mm, CP 5 e 6

Ainda observando a Figura 4.4, verifica-se de forma mais clara a atração das gotas devido ao efeito do campo magnético, podendo ou não haver a junção das mesmas, devido à tensão superficial, antes do destacamento. Pode-se destacar também que há uma tendência de junção das gotas mais próximo do arame guiado, concordando com a observação de um maior deslocamento do arco para o eletrodo de trás. Finalmente, pode-se ver mais claramente a poça sob o arco guiado. Nos casos anteriores, esta observação não é tão facilitada pelo movimento da poça durante os curtos-circuitos. Além disto, espera-se um maior efeito do arco, empurrando a gota para trás, quando a transferência é goticular.

Em relação à interferência entre os arcos elétricos (visível ao se colocar filtros que evidenciem mais o arco elétrico do que a transferência metálica), pode-se afirmar que ela realmente acontece, e que demonstra ser mais intensa para quanto maior for o comprimento do arco. No arco pequeno a interferência existe, mas é pouco perceptível visualmente. Quanto aos arcos médios, observa-se, na Figura 4.5 esta interferência, mostrando uma atração maior