

POLARIDADE E GERAÇÃO DE CALOR NO ARCO DE SOLDAGEM – PARTE 2

Volodymyr Ponomarov

Instituição e endereço: Universidade Federal de Uberlândia, Av. João Naves de Ávila, nº 2121, Bairro Santa Mônica, CEP 38400-902, Uberlândia – MG.

e-mail: vladimir@ufu.br

Hélio Cordeiro de Miranda

Instituição e endereço: Universidade Federal de Ceará, Av. da Universidade, 2853 - Benfica, Fortaleza - CE, CEP 60020-181

e-mail: hmiranda@ufc.br

Resumo: O arco elétrico representa uma excelente fonte de calor para soldagem, pois fornece energia suficientemente concentrada para fundir todos os metais e suas ligas. O calor gerado pelo arco é distribuído de modo não uniforme nas suas três regiões, sendo que as duas maiores parcelas são aplicadas exatamente onde é necessário, a saber, na ponta do eletrodo e na superfície do metal base, ou seja, nas regiões de queda anódica e catódica. A terceira região, a coluna de arco, com a menor parcela dessa distribuição de energia, atua como uma ligação elétrica (condutor) entre as regiões de queda e assegura a integridade do arco. Quase todo o calor gerado nas regiões anódica e catódica é aproveitado para fundir o metal de base e o eletrodo consumível (ou para aquecer o eletrodo não consumível). Analisando a geração do calor nas diferentes regiões do arco é necessário levar em consideração que nem todo o calor gerado no cátodo ou no ânodo será absorvido pelos mesmos, mas terá uma parcela transferida para o ânodo ou cátodo respectivamente (além de perdas para o meio ambiente). Na soldagem a arco, praticamente sempre é o cátodo que gera mais calor tanto no caso do eletrodo consumível, como no caso do eletrodo não consumível. Mas a maior parte deste calor é transferido para o ânodo via o fluxo de elétrons. Estes fenômenos são explicados neste trabalho de uma maneira de fácil percepção. A Parte 2 deste trabalho é dedicado à apresentação de uma abordagem combinada baseada nos modelos térmico e elétrico do arco com um intuito de esclarecer melhor os assuntos de geração de calor e, principalmente, do consumo dele nas diferentes regiões do arco de soldagem. Foi mostrado que tal abordagem permite sim fazer uma avaliação quantitativa dos fenômenos de geração e consumo do calor no arco de soldagem e assim justificar a escolha da polaridade, usualmente feita de maneira empírica, para cada caso na soldagem a arco elétrico.

Palavras-chave: Soldagem a arco; Polaridade; Geração e consumo de calor.

2.1 INTRODUÇÃO

Como foi mostrado na Parte 1 deste trabalho, para analisar os fenômenos da geração, transferência e consumo do calor na soldagem a arco são usados diferentes modelos, principalmente o modelo elétrico e o modelo térmico. Cada um deles tem suas vantagens e limitações. O modelo elétrico do arco é simples e é baseado em quantificação do calor gerado pelo efeito Joule nas diferentes regiões do arco, mas não explica a transferência de calor entre as regiões do arco. Ao passo que o modelo térmico leva em consideração a geração e a movimentação das cargas elétricas no arco e, logo, a transferência e a troca de calor entre o cátodo, o ânodo, a coluna do arco e o meio ambiente. Por outro lado, o modelo térmico é menos “preciso”, pois há grande variedade de processos físico-químicos a serem levados em consideração, em muitos casos, sem sequer avaliação quantitativa, ou seja, este modelo é do tipo parcialmente descritivo e deixa um certo nível da incerteza. Uma abordagem combinada baseada nos modelos térmico e elétrico do arco permite esclarecer melhor os assuntos de geração de calor e do consumo dele nas diferentes regiões do arco de soldagem, o que é assunto desta Parte 2 do trabalho.

2.2 GERAÇÃO, TRANSFERÊNCIA E APROVEITAMENTO DO CALOR NAS REGIÕES DO ARCO CONFORME O MODELO ELETRO-TÉRMICO DO ARCO

É óbvio que os principais “redistribuidores” do calor no arco de soldagem são os elétrons. Eles levam certa parcela de calor gerada no cátodo para o ânodo. A seguir são apresentadas abordagens simplificadas para quantificar tal redistribuição do calor no arco de soldagem sugeridas pelos Lancaster (1986), Modenesi (2004), Yarmuch e Patchett (2007).

O calor gerado no cátodo (Q_{cat}^{Σ}) é o calor gerado pela passagem dos elétrons pela região de queda catódica (daqui por diante o calor/energia gerado(a) ou consumido(a) está mostrado(a) em W, ou seja, por unidade de tempo como potência).

$$Q_{cat}^{\Sigma} = I_s * U_{cat} . \quad (2.1)$$

O calor aproveitado pelo cátodo, ou seja, difundido pela peça/eletrodo (Q_{cat}^+):

$$Q_{cat}^+ = Q_{cat}^{\Sigma} - Q_e - Q_t, \quad (2.2)$$

onde: Q_e – energia gasta para a emissão dos elétrons:

$$Q_e = I_s * \phi, \quad (2.3)$$

Q_t - energia gasta para o aquecimento dos elétrons até a temperatura da coluna do arco:

$$Q_t = \frac{3 * k * T * I_s}{2 * e}, \quad (2.4)$$

onde T é a temperatura do arco, k é a condutividade térmica e e a carga do elétron $1,6 * 10^{-19}$ C).

A Tabela 2.1 mostra como muda o valor da parcela $\frac{3 * k * T}{2 * e}$ em função da temperatura assumida do arco.

Tabela 2.1. Valor da parcela $\frac{3 * k * T}{2 * e}$ em função da temperatura do arco

T, K * 10 ³	2	3	4	5	6	7	8	9	10	15	20
$\frac{3 * k * T}{2 * e}, V$	0,26	0,39	0,52	0,65	0,78	0,91	1,04	1,16	1,29	1,94	2,59

Obs.: Para os cálculos a serem feitas, o valor da parcela $\frac{3 * k * T}{2 * e}$ foi considerada igual a 1 V.

Como será mostrado abaixo, no caso da soldagem com eletrodo consumível, assim como no caso da soldagem TIG com a polaridade CCEP, apenas graças à alta queda de tensão catódica, o cátodo, mesmo perdendo duas parcelas de energia gerada (Q_e e Q_t), ainda fica com uma parcela de calor maior de que tem o ânodo. Ao passo, que no caso do cátodo não consumível, a parcela restante de calor difundido pelo eletrodo será muito baixa.

O calor gerado no ânodo (Q_{an}^{Σ}) é o calor gerado pela passagem dos elétrons pela região de queda anódica:

$$Q_{an}^{\Sigma} = U_{an} * I_s. \quad (2.5)$$

O calor aproveitado pelo ânodo, ou seja, difundido pela peça/eletrodo (Q_{an}^+):

$$Q_{an}^+ = Q_{an}^{\Sigma} + Q_e + Q_t. \quad (2.6)$$

Chama-se atenção que alguns pesquisadores sugerem cálculos mais detalhados (Cobine, 1941, Fuerschbach, 1998, outros). Mas mesmo usando a abordagem simplificada apresentada acima, os resultados de cálculos são bastante confiáveis (veja a seguir).

2.2.1 GERAÇÃO, TRANSFERÊNCIA E APROVEITAMENTO DO CALOR NAS REGIÕES DO ARCO COM ELETRODO NÃO CONSUMÍVEL

Como visto das Equações (2.1 – 2.6), devido à distribuição do calor entre o cátodo e o ânodo, este último sempre “ganha”, mas isto não significa que o ânodo vai sempre ficar com um maior calor disponível para seu aquecimento e fusão. Os cálculos apresentados abaixo vão mostrar que tal situação acontece apenas na soldagem com eletrodo não consumível (por exemplo no processo TIG) na polaridade CCEN, já na polaridade CCEP, é o cátodo (que também fica na peça) que vai consumir mais calor. Os cálculos do calor gerado e consumido vão ser feitos para os testes 4 e 6 da Tab. 1.2 (da Parte 1 desse trabalho) cujos dados replicados aqui na Tab. 2.2 (para facilitar a análise).

Tabela 2.2 Resultados da medição da tensão do arco nas polaridades CCEN e CCEP na soldagem TIG (ver Tab. 1.2 da Parte 1 desse trabalho).

Teste	Diâmetro do eletrodo de W, mm	Polaridade	Corrente, A ajustada/ medida	Comprimento do arco, mm	Tensão do arco, V	Tensão específica da coluna, V/mm	Tensão $U_{cat} + U_{an}$, V
4	4,0	CCEN	60/62	4	11,2	0,6	8,8
6	4,0	CCEP	60/64	5	16,9	0,3	15,4

Obs.: Se assumir que o valor da U_{an} é de $\approx 2,0$ V (tanto para a polaridade CCEN, como CCEP; veja a Parte 1, item 1.2), a queda catódica U_{cat} será de 6,8 V para CCEN e de 13,4 V para CCEP.

Considerando a Função Trabalho do tungstênio de 4,5 eV e a do aço de 4,0 eV, o valor da $\frac{3*k*T}{2*e}$ igual a 1,0 V (ver Eq. 2.4 e Tab. 2.1) e o valor da U_{an} de $\approx 2,0$ V (tanto para a polaridade CCEN, como CCEP), o calor gerado e consumido por cada região do arco da polaridade **CCEN** (teste 4 da Tab. 2.2) será:

$$\text{Eq. (2.1)} \quad Q_{cat}^{\Sigma} = 62,0 \text{ A} * 6,8 \text{ V} = \mathbf{421,6 \text{ W}}. \quad (2.7)$$

$$\text{Eq. (2.2)} \quad Q_{cat}^{+} = 62,0 \text{ A} * (6,8 \text{ V} - 4,5 \text{ V} - 1,0 \text{ V}) = \mathbf{80,6 \text{ W}}. \quad (2.8)$$

$$\text{Eq. (2.5)} \quad Q_{an}^{\Sigma} = 62,0 \text{ A} * 2,0 \text{ V} = \mathbf{124,0 \text{ W}}. \quad (2.9)$$

$$\text{Eq. (2.6)} \quad Q_{an}^{+} = 62,0 \text{ A} * (2,0 \text{ V} + 4,5 \text{ V} + 1,0 \text{ V}) = \mathbf{465 \text{ W}}. \quad (2.10)$$

$$Q_{col} = 62,0 \text{ A} * 4,0 \text{ mm} * 0,6 \frac{\text{V}}{\text{mm}} = \mathbf{148,8 \text{ W}}. \quad (2.11)$$

Todas as regiões perdem o calor para o meio ambiente, mas a poça de fusão e a região do metal de base ao seu redor se aproveitam do calor oriundo da coluna (com estimativa de aproximadamente 1/4 do calor gerado na coluna). Logo o calor aproveitado pelo ânodo Q_{an}^{+} pode chegar a:

$$465 \text{ W} + \frac{1}{4} \text{ de } 148,8 \text{ W} = \mathbf{502,2 \text{ W}}. \quad (2.12)$$

Já o calor consumido pela coluna do arco será, aproximadamente:

$$148,8 \text{ W} - \frac{1}{4} \text{ de } 148,8 \text{ W} = \mathbf{111,6 \text{ W}}. \quad (2.13)$$

Conforme o modelo térmico, o calor total gerado no arco será:

$$421,6 \text{ W (Eq. 2.7, cátodo)} + 124,0 \text{ W (Eq. 2.9, ânodo)} + 148,8 \text{ W (Eq. 2.11, coluna)} = \mathbf{694,4 \text{ W}}. \quad (2.14)$$

Conforme o modelo térmico, o calor total consumido no arco será:

$$80,6 \text{ W (Eq. 2.8, cátodo)} + 502,2 \text{ W (Eq. 2.12, ânodo)} + 111,6 \text{ W (Eq. 2.13, coluna)} = \mathbf{694,4 \text{ W}}. \quad (2.15)$$

Conforme o modelo elétrico do arco, o calor total gerado no arco é de:

$$62,0 \text{ A} * 11,2 \text{ V} = \mathbf{694,4 \text{ W}}. \quad (2.16)$$

Para a polaridade **CCEP** (teste 6 da Tab. 2.2) os cálculos mostram os seguintes resultados:

$$\text{Eq. (2.1)} \quad Q_{cat}^{\Sigma} = 64,0 \text{ A} * 13,4 \text{ V} = \mathbf{857,6 \text{ W}}. \quad (2.17)$$

$$\text{Eq. (2.2)} \quad Q_{cat}^{+} = 64,0 \text{ A} * (13,4 \text{ V} - 4,0 \text{ V} - 1,0 \text{ V}) = \mathbf{537,6 \text{ W}}. \quad (2.18)$$

$$\text{Eq. (2.5)} \quad Q_{an}^{\Sigma} = 64,0 \text{ A} * 2,0 \text{ V} = \mathbf{128,0 \text{ W}}. \quad (2.19)$$

$$\text{Eq. (2.6)} \quad Q_{an}^{+} = 64,0 \text{ A} * (2,0 \text{ V} + 4,0 \text{ V} + 1,0 \text{ V}) = \mathbf{448,0 \text{ W}}. \quad (2.20)$$

Como foi indicado acima, o arco da polaridade CCEP é muito instável com mudanças bruscas do seu comprimento, o que dificulta a avaliação tanto do volume de calor gerado na coluna do arco, como da transferência do calor da coluna para a peça. O valor aproximado do calor gerado na coluna do arco pode ser:

$$Q_{col} = 64,0 \text{ A} * 0,3 \frac{\text{V}}{\text{mm}} * 5,0 \text{ mm} = \mathbf{96,0 \text{ W}}. \quad (2.21)$$

Seguindo a mesma premissa feita no caso da polaridade CCEN, é considerado que na polaridade CCEP a poça de fusão e o metal de base ao redor dela aproveitam do calor indo da coluna (na ordem de 1/4 do calor gerado na coluna). Logo o calor aproveitado pelo cátodo Q_{cat}^{+} pode chegar a:

$$537,6 \text{ W} + \frac{1}{4} \text{ de } 96,0 \text{ W} = \mathbf{561,6 \text{ W}}. \quad (2.22)$$

Já o calor consumido pela coluna do arco será, aproximadamente:

$$96,0 \text{ W} - \frac{1}{4} \text{ de } 96,0 \text{ W} = 72,0 \text{ W}. \quad (2.23)$$

Conforme o modelo térmico, o calor total gerado no arco será:

$$857,6 \text{ W (Eq. 2.17, cátodo)} + 128,0 \text{ W (Eq. 2.19, ânodo)} + 96,0 \text{ W (Eq. 2.21, coluna)} = 1081,6 \text{ W}. \quad (2.24)$$

Conforme o modelo térmico, o calor total consumido no arco será:

$$561,6 \text{ W (Eq. 2.22, cátodo)} + 448,0 \text{ W (Eq. 2.20, ânodo)} + 72,0 \text{ W (Eq. 2.23, coluna)} = 1081,6 \text{ W}. \quad (2.25)$$

Conforme o modelo elétrico do arco, o calor total gerado no arco é de:

$$64,0 \text{ A} * 16,9 \text{ V} = 1081,6 \text{ W}. \quad (2.26)$$

O leitor pode ser surpreendido com a perfeita coincidência entre os valores do calor total gerado no arco calculados conforme o modelo térmico do arco e conforme o modelo elétrico dele ao comparar Eqs. (2.14 e 2.16) e Eqs. (2.24 e 2.26). Isto aconteceu devido a um certo “ajuste” nos cálculos conforme o modelo térmico. Os valores de confiança do calor total gerado no arco são aqueles conforme o modelo elétrico, pois são baseados nos valores da corrente e da tensão do arco medidos durante os testes. Os valores dos parâmetros usados nos cálculos conforme o modelo térmico (U_{an} , U_{cat} , $\frac{3*k*T}{2*e}$, etc.) foram escolhidos dentro das faixas encontradas na literatura e de maneira a assegurar a igualdade entre os valores do calor total gerado no arco calculados conforme os dois modelos.

Os resultados dos cálculos (sem separar perdas do calor para o meio ambiente, que pode chegar até 15%) são organizados na forma de Tab. 2.3 o que é apenas um exemplo da distribuição típica do calor entre as regiões do arco na soldagem TIG. Há alguns fatores que podem mudar esta distribuição, por exemplo, o tipo de gás de proteção, o comprimento do arco, o tipo do metal de base entre outros. Uma transferência do calor gerado na coluna do arco para o eletrodo e, principalmente, para a peça também tem que ser levada em consideração. Embora uma parte considerável deste calor está perdida para o meio ambiente pela convecção e radiação, uma certa parte dele é absorvida pelo metal de base pela convecção forçada (movimento forçado do gás) devido ao jato de plasma que é sempre direcionado do eletrodo para a peça, assim como pela radiação e difusão. Mas o volume deste calor é de difícil estimação.

Tabela 2.3. Resultados dos cálculos do calor gerado e do calor consumido/absorvido para polaridades CCEN e CCEP na soldagem TIG com o arco de 4 mm de comprimento usando o eletrodo de diâmetro de 4,0 mm (ver Tab. 1.2 da Parte 1).

Região \ Polaridade	CCEN (62 A)		CCEP (64 A)	
	Calor gerado, W/%	Calor absorvido (junto com perdas para o meio ambiente), W/%	Calor gerado, W/%	Calor absorvido (junto com perdas para o meio ambiente), W/%
Cátodo	421,6 / 60,7	80,6 / 11,6	857,6 / 79,3	561,6 / 51,9
Coluna	148,8 / 21,4	111,6 / 16,1	96,0 / 8,9	72,0 / 6,7
Ânodo	124,0 / 17,9	502,2 / 72,3	128,0 / 11,8	448,0 / 41,4
Total	694,4 / 100,0	694,4 / 100,0	1081,6 / 100,0	1081,6 / 100,0

A análise dos resultados contidos na Tab. 2.3 pode conduzir a conclusões muito importante no que diz respeito a geração e o consumo do calor nas diferentes regiões do arco elétrico de soldagem com eletrodo não consumível, a saber:

- 1 No processo de soldagem com o cátodo de material refratário (como no caso, na soldagem TIG), o calor consumido pelo cátodo é 5 – 6 vezes menor do que o calor gerado nele (compare os valores 80,6 e 421,6 W para o cátodo da 3ª e 2ª colunas respectivamente), enquanto o calor consumido pelo ânodo é, aproximadamente, 4 vezes maior do que o calor gerado nele (compare os valores 502,2 e 124,0 W para o ânodo da 3ª e 2ª colunas respectivamente). Este fato (que o eletrodo não está sobreaquecido e mais calor é disponível para a poça de fusão) é usado na soldagem TIG, onde a polaridade recomendada é exatamente esta – CCEN;
- 2 Ao trocar a polaridade no processo de soldagem TIG da CCEN para a CCEP, o calor consumido pelo ânodo (agora localizado no eletrodo de tungstênio) continua ser 3 – 4 vezes maior do que o calor gerado nele (compare os valores 448,0 e 128,0 W para o ânodo da 5ª e 4ª colunas), enquanto que o calor consumido pelo cátodo (deslocado para a peça) é menor do que o calor gerado nele (compare os valores 561,6 e 857,6 W para o cátodo da 5ª e 4ª colunas), mas ainda estar maior do que calor consumido pelo ânodo (448,0 W, coluna 5);
- 3 A segunda conclusão mostra que, desrespeito à polaridade na soldagem TIG, a peça, usualmente, absorve mais calor do que o eletrodo, embora na polaridade CCEP, estes valores são próximos e, até, pode acontecer que em alguns casos, já o eletrodo (ânodo) vai absorver mais calor;

- 4 A área afetada pela mancha catódica na polaridade CCEP é muito larga, por isso mesmo com calor disponível alto, a densidade de energia é tão baixa que em alguns casos (se a corrente estar baixa) não acontece a formação da poça de fusão (ver Fig. 1.8 da Parte 1 desse trabalho);
- 5 Na polaridade CCEP, o calor consumido pelo eletrodo (ânodo) é aproximadamente 6 vezes maior do que o calor consumido pelo eletrodo na polaridade CCEN (compare os valores 448,0 W para o eletrodo-ânodo e 80,6 W para o eletrodo-cátodo da 5ª e 3ª colunas), o que coincide bem com a diferença entre os valores de corrente recomendados para os eletrodos de diferentes diâmetros a serem usados nas polaridades CCEN e CCEP.

Conforme Tab. 2.3, a peça absorveu mais calor na polaridade CCEP (561,6 W vs 502,2 W em CCEN). Este fato contradiz com alguns dados encontrados na literatura técnica, mas coincide bem com resultados experimentais. A Figura 2.1 mostra duas barras de alumínio submetidas à ação do arco do processo TIG nas mesmas condições de soldagem, mas em polaridades diferentes CCEN e CCEP. As barras foram colocadas na posição vertical para aumentar a densidade da entrada de calor e assim igualizar as condições para ambas as polaridades (usualmente a zona afetada pelo arco na chapa é bem mais larga na polaridade CCEP). Foi observado que na polaridade CCEP a barra, sim, recebeu mais calor. A explicação deste fato é simples o bastante se levar em consideração os resultados da Tab. 2.3 (lembrando que o metal de base é diferente nestes dois casos). Embora a porcentagem do calor absorvido pelo metal de base na polaridade CCEP é menor do que na polaridade CCEN (51,9% vs 72,3%), o arco da polaridade CCEP gera mais calor (1081,6 W vs 694,4 W), acarretando um maior valor absoluto do calor absorvido pelo metal de base (561,6 W vs 502,2 W).



Figura 2.1. Barras de alumínio submetidas à ação do arco do processo TIG nas mesmas condições de soldagem, mas em polaridades diferentes CCEN e CCEP

A estrutura do arco como um gerador de calor na soldagem com eletrodo não consumível pode ser ilustrada por meio de Figs. 2.2 e 2.3.

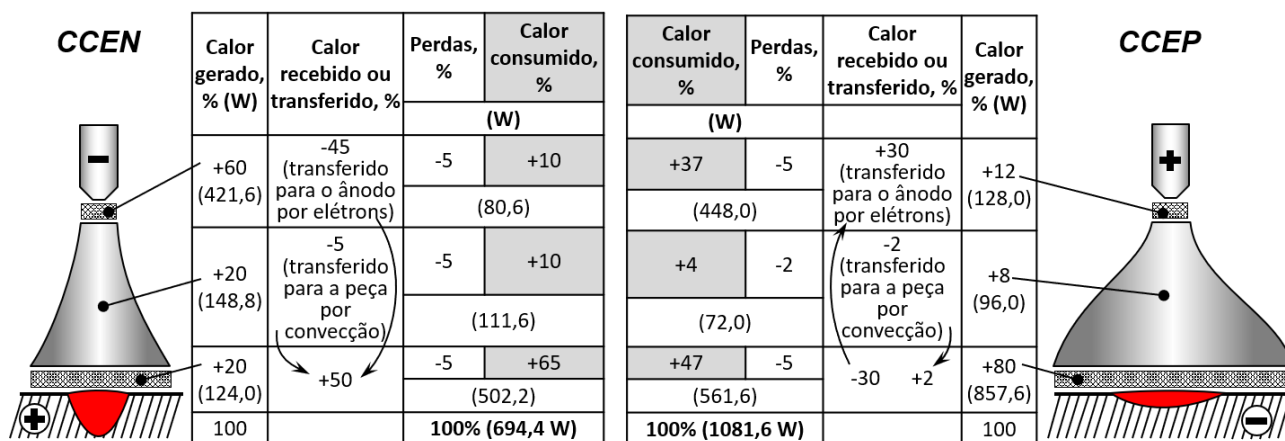


Figura 2.2 Ilustração da distribuição do calor ao longo do arco elétrico na soldagem TIG (com eletrodo não consumível), com o comprimento do arco de ≈ 4 mm, $I_s \approx 60$ A, gás de proteção – Argônio.

Como é visto da Fig. 2.2, os valores das parcelas de calor apresentados em W e em porcentagem não sempre “batem” entre si. Isto porque os valores em porcentagem são de tipo genérico, bem aproximados. Os valores em porcentagem reais podem variar em 5 – 10% influenciados pelo comprimento do arco, corrente de soldagem, diâmetro e tipo de eletrodo, premissas diferenciadas, etc.

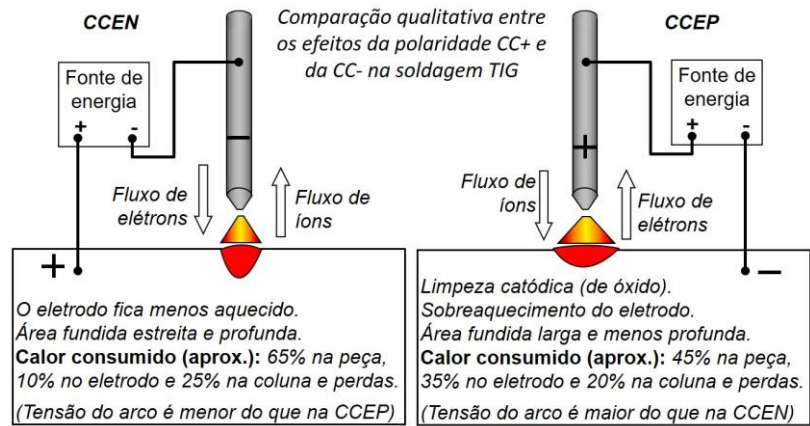


Figura 2.3 Ilustração do efeito da polaridade sobre a formação do cordão e outros aspectos operacionais na soldagem TIG

2.2.2 GERAÇÃO, TRANSFERÊNCIA E APROVEITAMENTO DO CALOR NAS REGIÕES DO ARCO COM ELETRODO CONSUMÍVEL

Se estender a mesma abordagem de análise para a soldagem com eletrodo consumível (processo MIG/MAG) será possível chegar às seguintes conclusões. No processo MIG/MAG com a transferência metálica do tipo goticular (spray), o arco longo (que é, usualmente, de 10 mm ou mais) aumenta a geração e, no mesmo tempo, as perdas de calor pela coluna do arco (Fig. 2.4). Logo, a eficiência térmica do processo MIG/MAG com a transferência metálica do tipo goticular é bem mais baixa (menos que 70%) comparada com a eficiência térmica do processo MIG/MAG com a transferência metálica por curto-circuito (arco curto), que chega a 80 – 85% graças as menores perdas de calor na coluna do arco (Fig. 2.5).

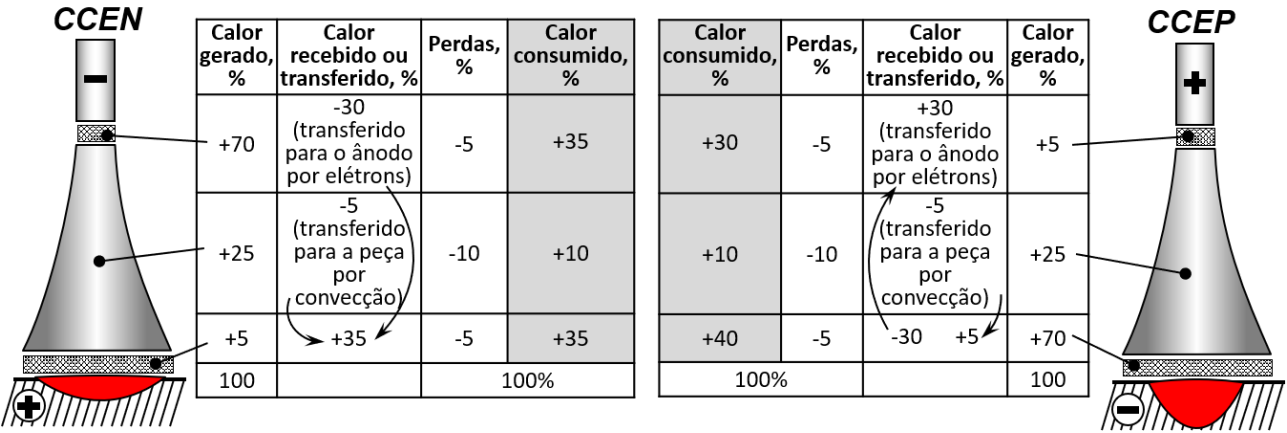


Figura 2.4 Ilustração da distribuição do calor ao longo do arco elétrico na soldagem MIG/MAG com a transferência do tipo spray (arco longo)

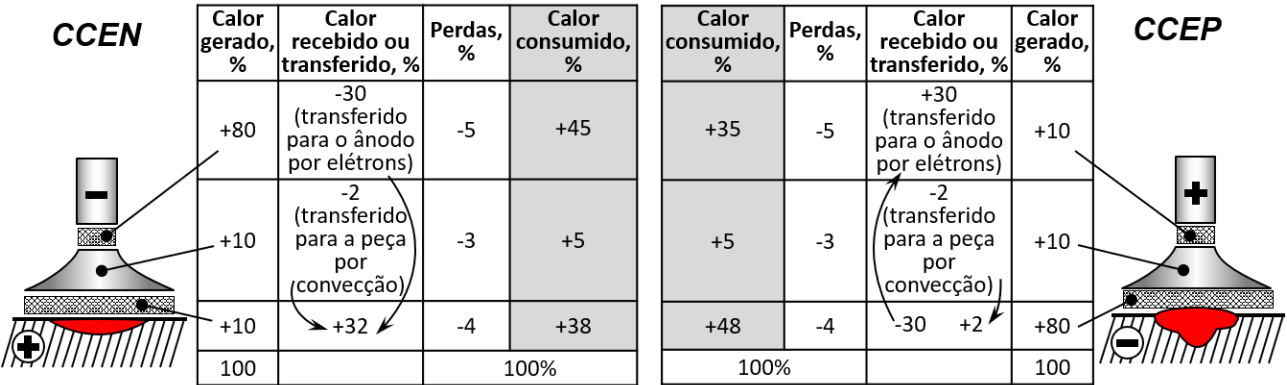


Figura 2.5 Ilustração da distribuição do calor ao longo do arco elétrico na soldagem MIG/MAG com o arco curto (transferência por curto-circuito)

No processo MIG/MAG com a polaridade CCEP, o balanço do calor gerado e consumido nas diferentes regiões do arco é próximo ao do caso do processo TIG na mesma polaridade, pois em ambos os casos o cátodo localizado na peça emite elétrons “por campo”. Isto é mais óbvio para o arco curto com a transferência metálica por curto-circuito. Ao trocar a polaridade no processo MIG/MAG da CCEP para a CCEN, o calor gerado no cátodo, agora localizado na ponta do arame-eletrodo, continua emitir elétrons “por campo” gerando muito calor (mais do que na área anódica) e aumentando em até 50% - 70% a taxa de fusão do eletrodo dependendo do material e do diâmetro do arame, do gás de proteção e do nível de corrente (Scotti e Ponomarev, 2014). No mesmo tempo, o acréscimo do calor disponível na ponta do eletrodo na polaridade CCEN em apenas 5 – 10% em comparação com a polaridade CCEP (veja as colunas “Calor consumido” nas Figs. 2.4 e 2.5) não é suficiente para justificar o aumento observado da taxa de fusão do arame eletrodo em 50% - 70%.

A resposta pode ser encontrada no comportamento diferenciado do acoplamento arco – eletrodo na polaridade CCEN. Em CCEP, o ponto de contato do arco com o arame-eletrodo se dá na extremidade do eletrodo. Ao passo que na condição CCEN, o arco não se acopla apenas sobre a gota, mas envolvendo a superfície lateral do arame (como fosse o arco subindo no arame), tornando-se significativamente mais longo e fazendo mais fluido um maior comprimento da ponta do arame. Isto pode ser uma das explicações do aumento “exagerado” da taxa de fusão do arame eletrodo, pois este fato favorece à transferência do calor da área catódica para o arame. Mas o modo da transferência metálica na polaridade CCEN é geralmente desfavorável (globular irregular) prejudicando a fusão do metal de base e a formação do cordão.

Cabe salientar que no processo MIG/MAG com a transferência metálica por curto-circuito, uma parte de calor é gerada durante a transição do metal líquido da ponta de eletrodo para a poça de fusão na ausência do arco, ou seja, apenas pelo efeito joule. Se comparar a potência elétrica durante um curto-circuito e durante o arco aberto, o primeiro valor vai ser 4 – 5 vezes mais baixo (compare os valores de 720 W para o momento do curto-circuito e 2800 W para o arco aberto num exemplo mostrado na Fig. 2.6), pois embora a corrente de curto-circuito pode ser 1,5 – 2 vezes (em média) maior do que a corrente de arco aberto, a tensão do curto-circuito é muito baixa (em torno de 1 - 4 V, ou seja, aproximadamente 7 vezes mais baixa do que a tensão do arco aberto). Logo, mesmo que o tempo somatório dos curtos-circuitos possa ser significativa (20 – 30% do tempo total de soldagem), a parcela de calor gerada durante os curtos-circuitos não ultrapassa 5 – 10% do todo calor gerado no processo. Todavia, mesmo representando um baixo valor percentual, a fase de curto-circuito reduz a geração do calor na soldagem MIG/MAG (Fig. 2.7), justificando a tendência da soldagem MIG/MAG por curto circuito acarretar baixa penetração e oferecer melhores condições para soldagem de chapas finas e soldagem fora da posição plana.

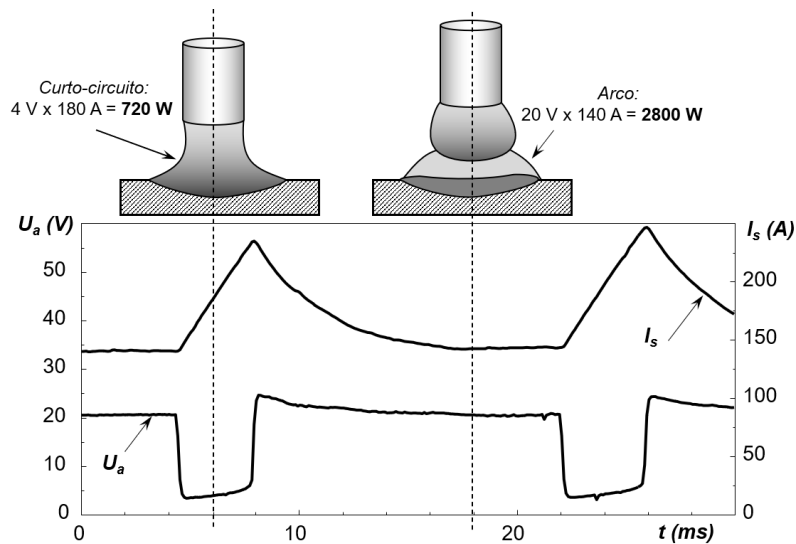


Figura 2.6 Distribuição do calor ao longo do arco elétrico na soldagem MIG/MAG com arco curto (transferência por curto-circuito)

É necessário lembrar também sobre a geração do calor na extensão do eletrodo pelo efeito joule, o que acontece tanto na soldagem por curtos-circuitos, como na soldagem com a transferência goticular. No segundo caso esse fenômeno é bem mais pronunciado (devido a maiores correntes e extensões de eletrodo). Essa parcela de calor, normalmente, é adicionada ao calor gerado no acoplamento “arco – eletrodo consumível”, pois praticamente impossível medir a queda de tensão nesse acoplamento sem incluir as quedas de tensão na extensão do eletrodo e na gota de metal líquido. Este fato também dificulta a análise dos fenômenos da geração, transferência e consumo do calor na soldagem a arco com eletrodo consumível.

Na soldagem MIG/MAG (ou seja, com eletrodo consumível), diferentemente do caso da soldagem TIG, o calor absorvido pela peça é bem maior chegando aos 80 – 85% de todo calor gerado no arco, devido ao fato que o metal fundido do ânodo também acaba passando para a poça de fusão pela transferência metálica. Soderstrom et al. (2011) mostram que esta parcela de calor chega a 20 a 30% do calor total gerado pelo arco. Mesmo ser um valor considerável, não vale a pena “corrigir” as ilustrações da distribuição do calor apresentadas nas Figs. 2.4 e 2.5, pois o calor contido nas gotas de metal líquido, não representa uma contribuição significativa, devido ao fato que, tanto o metal de gotas, como o metal da poça de fusão estão no estado líquido com a temperatura das gotas apenas 5 – 15% maior. O calor trazido pelas gotas de metal líquido para a poça de fusão não é concentrado o bastante, assim reduzindo a eficiência de fusão do metal de base. Ademais, pode acontecer que o metal de adição vai prejudicar à fusão do metal de base pelo efeito da interposição da poça. Quanto maior a poça de fusão interposta entre o arco e o metal de base, resultado de uma maior taxa de deposição para uma dada velocidade de soldagem (velocidade longitudinal de deslocamento da tocha), mais difícil se torna a transferência de calor para o metal de base e menor se torna a eficiência de fusão do metal de base. O que é certo é que o calor trazido pelas gotas do metal de adição aumenta o aporte de calor do processo de soldagem MIG/MAG. Vale lembrar que uma parcela do calor carregado pelas gotas é perdida para o ambiente devido aos respingos e à evaporação metálica.

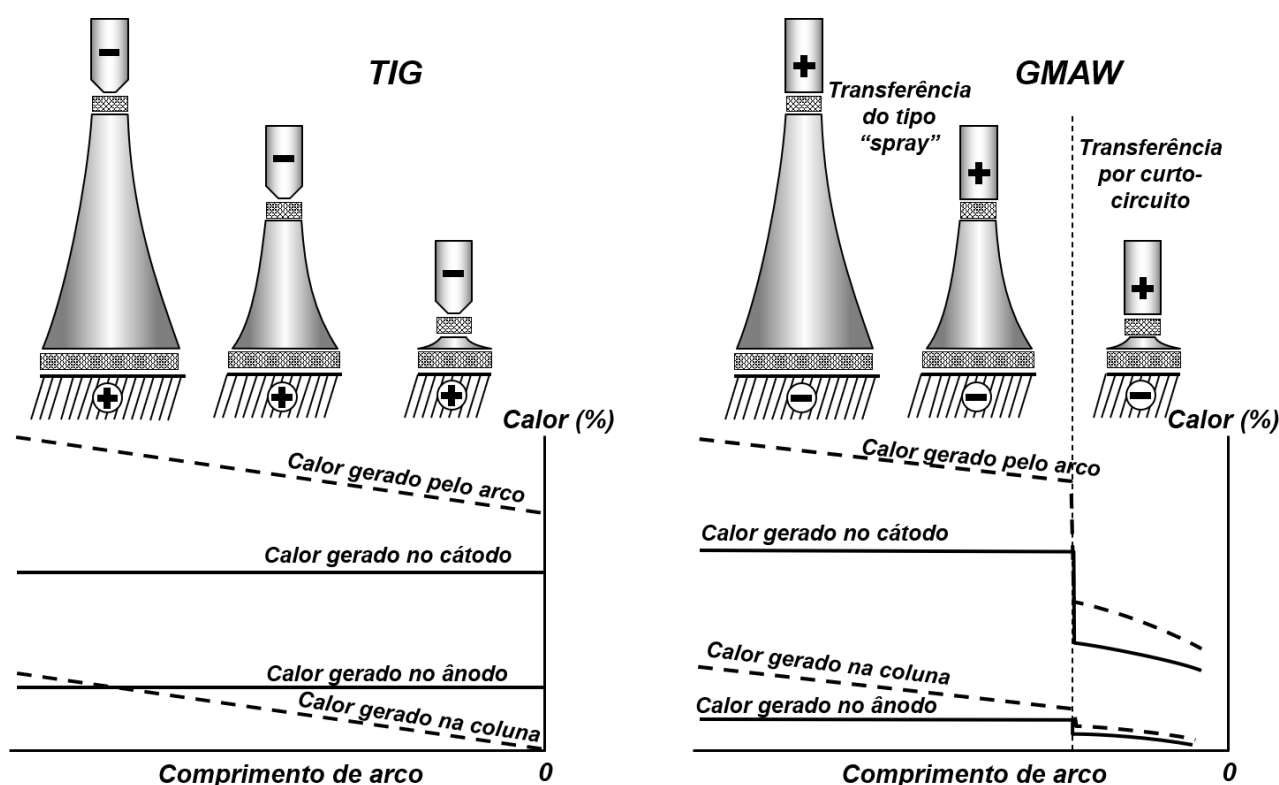


Figura 2.7 Ilustração do efeito da transferência por curto-circuito na geração de calor na soldagem MIG/MAG (em comparação com a soldagem TIG)

O efeito da polaridade sobre a formação do cordão e outros aspectos operacionais da soldagem MIG/MAG é ilustrado, de maneira generalizada, pela Fig. 2.8.

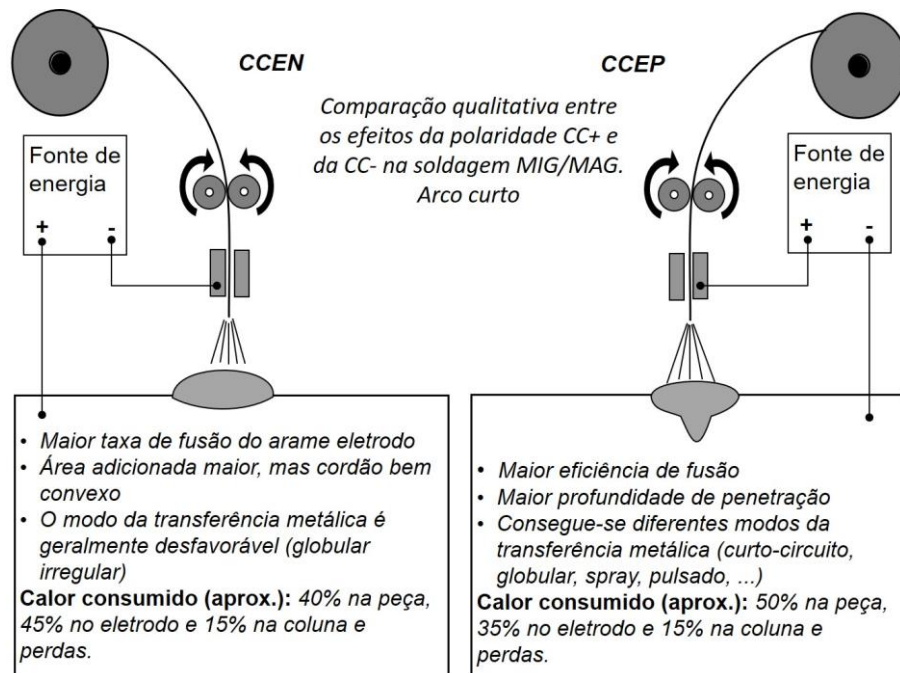


Figura 2.8 Ilustração do efeito da polaridade sobre a formação do cordão e outros aspectos operacionais da soldagem MIG/MAG (arco curto)

2.3 CONCLUSÃO

Uma análise combinada baseada nos modelos térmico e elétrico do arco permite fazer uma avaliação quantitativa dos fenômenos de geração de calor e, principalmente, do consumo dele nas diferentes regiões do arco de soldagem e assim contribuir para a escolha da polaridade, usualmente feita de maneira empírica, para cada caso na soldagem a arco elétrico.

2.4 REFERÊNCIAS

- Cobine, J.D. Gaseous Conductors. McGraw-Hill, 1941.
- Fuerschbach, P.W. Cathodic Cleaning and Heat Input in Variable Polarity Plasma. Welding Journal, Feb. 1998, 76-85.
- Kruscha, J.: Untersuchungen zum Einsatz geregelt gepulster Lichtbögen zur Beeinflussung der Schmelzbaderstarrung. In: Abschlussbericht des DFG/AiF-Cluster "Lichtbogenschweißen - Physik und Werkzeug" Teilprojekt A1, Hochschule Lausitz – IIM, 2012
- Lancaster, J.F. The Electric Arc in Welding. In: Lancaster, J.F. The Physics of Welding. 2. ed. University of Michigan: Pergamon, 1986. Cap. 6.
- Modenesi, P.J. e Bracarense, A.Q. Introdução à Física do Arco Elétrico E sua Aplicação na Soldagem dos Metais. Belo Horizonte: [s.n.], 2004.
- Scotti, A. e Ponomarev, V. (2014). Soldagem MIG/MAG: Melhor entendimento, melhor desempenho. São Paulo: ArtLiber, 288 p.
- Soderstrom, E.J., Scott, K.M. e Mendez, P.F. "Calorimetric Measurement of Droplet Temperature in GMAW", Welding Journal, AWS, Apr 2011, 90 (1), pp. 1s-8s.
- Yarmuch, M.A.R. e Patchett, B.M. Variable AC Polarity GTAW Fusion Behavior in 5083 Aluminum. Welding Journal, July 2007. 196-200.

2.5 RESPONSABILIDADE PELAS INFORMAÇÕES

Os autores são os únicos responsáveis pelas informações incluídas neste trabalho.

POLARITY AND HEAT GENERATION IN THE WELDING ARC – PART 2

Volodymyr Ponomarov

Institution and address: Federal University of Uberlandia, Av. Joao Naves de Avila, nº 2121, Bairro Santa Monica, CEP 38400-902, Uberlandia – MG.

e-mail: vladimir@ufu.br

Helio Cordeiro de Miranda

Institution and address: Federal University of Ceara, Av. da Universidade, 2853 - Benfica, Fortaleza - CE, CEP 60020-181

e-mail: hmiranda@ufc.br

Abstract: *The electric arc represents an excellent source of heat for welding, as it provides energy concentrated enough to melt all metals and their alloys. The heat generated by the arc is distributed non-uniformly in its three regions, and the two largest portions are applied exactly where it is needed, namely, at the electrode tip and on the surface of the base metal, that is, in the anodic and cathodic fall regions. The third region, the arc column, with the smallest share of this energy distribution, acts as an electrical link (conductor) between the fall regions and ensures the integrity of the arc. Almost all of the heat generated in the anode and cathode regions is used to melt the base metal and the consumable electrode (or to heat the non-consumable electrode). Analysing the generation of heat in the different regions of the arc, it is necessary to take into account that not all the heat generated in the cathode or anode will be absorbed by them, but will have a portion transferred to the anode or cathode respectively (beside of losses to the environment). In arc welding, it is practically always the cathode that generates more heat both in the case of the consumable electrode and in the case of the non-consumable electrode. But most of this heat is transferred to the anode via the flow of electrons. These phenomena are explained in this work in a way of easy perception. Part 2 of this work is dedicated to the presentation of a combined approach based on thermal and electrical models of the arc in order to better clarify the issues of heat generation and, mainly, its consumption in the different regions of the welding arc. It was shown that such an approach does allow a quantitative assessment of the phenomena of generation and consumption of heat in the welding arc and thus justify the choice of polarity, usually made empirically, for each case in electric arc welding.*

Keywords: Arc Welding; Polarity; Heat generation and consumption.

RESPONSIBILITY NOTICE

The authors are the only responsible for the printed material included in this paper.