

O Arco TIG a 100 A e Argônio Puro É um Arco Especial?

(Is the 100-A TIG Arc with Pure Argon Special?)

Louriel O. Vilarinho¹

¹Universidade Federal de Uberlândia, Laprosolda – Centro para Pesquisa e Desenvolvimento de Processos de Soldagem, Uberlândia/MG, 38400-902, vilarinho@mecanica.ufu.br

Resumo

Partindo da afirmação de que um melhor entendimento dos mecanismos físicos que regem os processos de soldagem pode ser traduzido em maiores níveis de consistência e produtividade destes processos, resta, então, investigar e estudar tais mecanismos. Dentre as diversas abordagens para a caracterização física do processo, o estudo do arco elétrico procura destacar a estabilidade do processo com base nos fenômenos envolvidos. De forma específica para a soldagem a arco, onde alta qualidade é requerida, o processo TIG se destaca. Focando-se mais ainda neste processo, um conjunto de parâmetros chama a atenção: corrente de 100 A e gás de proteção argônio puro. Estes valores atribuem ao arco uma característica especial de transição sob diferentes pontos de vista (característica estática, regime laminar-turbulento, dimensões do arco e queda de tensão anódica). Estas características são apresentadas e discutidas. Espera-se que esta discussão seja lançada como um desafio aos leitores da Revista Soldagem & Inspeção para que contribuam com seus pontos de vista e/ou mais informações, procurando consolidar o conhecimento do arco elétrico em processo não-consumível e que possa, ao final, reverter em resultados tecnológicos para melhor uso do processo.

Palavras-chave: Física do Arco; Transição; Arco Elétrico.

Abstract: By stating that an improved understanding of the physical mechanisms controlling process performance can usually be translated into higher levels of consistency and productivity for that process, it is expected to investigate these mechanisms. Among the various approaches for process physical characterisation, the electric-arc study unveils the process stability from the related phenomena. Specifically for arc welding, which high quality levels are required, the TIG process outstands. Further looking into this process, a parameter set calls the attention: 100-A current and pure argon as shielding gas. These values attribute to the arc special transitional characteristics, such as static characteristic, laminar-turbulent regime, arc dimensions and anode voltage fall. These characteristics are presented and discussed. From this discussion, a challenging for the Revista Soldagem & Inspeção readers is brought out. The idea is gathering their point of view and contributions with the objective of consolidating the knowledge on the electric arc in non-consumable process and, eventually, leading to technological results for a better process application.

Key-words: Arc Physics; Transition; Electric Arc.

1. Introdução

O objetivo final de um processo de manufatura é assegurar ganhos de qualidade e produtividade de uma determinada peça/produto. Assim, a busca por uma condição otimizada e/ou robusta, através de procedimentos sistemáticos como planejamento estatístico ou modelo matemático/computacional, pode levar a um ganho ainda maior do processo. Em adição, o conhecimento dos fenômenos físicos, que governam o processo, pode criar atalhos nesta busca, otimizando a procura pelo ótimo e levando a redução de custos durante a execução de um planejamento experimental. Desta forma, é de suma importância o bom entendimento dos fundamentos do processo e, em específico

para a soldagem, grande parte dos processos se baseia na fusão com uso de arco elétrico.

O arco elétrico em soldagem compreende uma região relativamente pequena do espaço (~100 mm³) caracterizada por elevadas temperaturas (~20.000K), forte radiação luminosa e ultravioleta, fluxo intenso de matéria e elevados gradientes de propriedades físicas. O arco elétrico é um exemplo de plasma (assim como o núcleo do sol, o interior de lâmpadas fluorescentes, chamas e a ionosfera). O plasma pode ser definido com um gás ionizado composto por elétrons, íons e átomos neutros, ou seja, um conjunto quase-neutro de partículas que satisfazem certos critérios [1]. Um dos primeiros artigos que descrevem a física de plasma aplicada na soldagem foi a revisão bibliográfica da Ref. [2] em 1943, seguida das Refs. [3-6] e a Refs. [7], [8, 9] e [10], nas décadas de 70 e 80 e início dos anos 90, respectivamente. Mais recentemente, com os avanços na tecnologia de uma forma geral (informática, aquisição de dados, filmagem e tratamento

(Recebido em 19/04/2009; Texto Final em 05/06/2009).

de imagens digitais), há a revisão bibliográfica das Refs. [11-14].

A pergunta a ser respondida então seria: “A soldagem realmente precisa do conhecimento da física do plasma?” Esta questão foi respondida nas Refs. [15, 16]. Ambos afirmam que um melhor entendimento dos mecanismos físicos que regem os processos de soldagem pode ser traduzido em maiores níveis de consistência e produtividade destes processos. Resta então, investigar e estudar tais mecanismos.

Nesta busca, a presente discussão foca num aspecto observado pelo autor [17] em relação às características de transição apresentadas por arcos TIG a 100 A e argônio puro (Figura 1). Estes parâmetros são utilizados na prática em soldagens que requerem alta qualidade e materiais não-ferrosos, por exemplo. Desta forma, o objetivo é apresentar e discutir as características de transição que tornam o arco TIG a 100 A e argônio puro um arco especial. Evidências serão apresentadas ao longo do texto, que tais parâmetros operacionais refletem possíveis transições de comportamento em arcos TIG, tornando-os, portanto, especiais.

Espera-se que este desafio ajude a discussão deste tema na comunidade da soldagem. Neste contexto o presente artigo, apesar de apresentar informações tiradas da literatura corrente, não deve ser caracterizado como uma pura revisão bibliográfica, o que é reforçado por apresentar cálculos realizados dedicados ao trabalho.



Figura 1. Fotografia de um arco TIG, 100 A, Ar puro, eletrodo AWS WTh2, 3,2 mm de diâmetro [18].

2. Características Transacionais Observadas

Quatro características que definem um arco elétrico foram selecionadas para discutir a importância do arco elétrico que se forma no processo TIG quando este opera a 100 A, com argônio puro como gás de proteção. Estas características (característica estática do arco, velocidade do plasma, dimensões do arco e queda de tensão anódica) são a seguir apresentadas e discutidas.

2.1. Característica Estática

O primeiro ponto a ser discutido refere-se à característica estática do arco. A Figura 2 traz a característica estática de um arco padrão para estudos da física do arco [19], ou seja, arco TIG com comprimento do arco de 5 mm, eletrodo AWS WTh2 (3,2 mm de diâmetro), ângulo de apontamento de 60°, truncado em

0,2 mm e argônio a 10 L/min. Nota-se a variação que acontece a partir de 100 A com o início da região de linearidade ascendente da curva. Assim, é possível afirmar que o arco de 100 A tem um aspecto de transição, que está relacionado com o ponto onde há o balanço entre emissão eletrônica e condutividade elétrica.

Este balanço ocorre devido ao fato do aumento da corrente provocar um aumento da temperatura do plasma, e conseqüentemente, um aumento da sua condutividade elétrica. Assim, a partir de menores correntes (por exemplo, 20 A) até 100 A, não se faz necessário o aumento do número de elétrons emitidos a partir do efeito termiônico, pois as partículas existentes já se movem mais rapidamente devido ao aumento da temperatura, conseguindo transportar todo o fluxo de corrente. Esta maior facilidade em se promover o fluxo de partículas implica na necessidade de menos tensão disponível para o sistema, ou seja, com o aumento da corrente a tensão passa a cair. Entretanto, esta queda não é ininterrupta. A partir do ponto de balanço, aqui proposto como sendo 100 A, o grande número de cargas elétricas começa a implicar num maior choque e maior aquecimento, levando à maior transferência (perda) de calor para o ambiente. Assim, maior número de elétrons deverão ser emitidos para suprir aqueles que estão se recombinando com íons positivos, devido à transferência de calor. Desta forma, para se emitir tais elétrons, maior tensão passa a ser requerida continuamente.

Embora se esteja destacando os aspectos do arco de argônio, característica similar ocorre quando há a adição de hélio, como mostra a Figura 3. Assim, a característica especial de transição do arco TIG em questão pode ser estendida para outras misturas gasosas. Entretanto, o autor não possui resultados neste sentido, tornando a proposição do desafio mais interessante e convidando à comunidade científica à discussão.

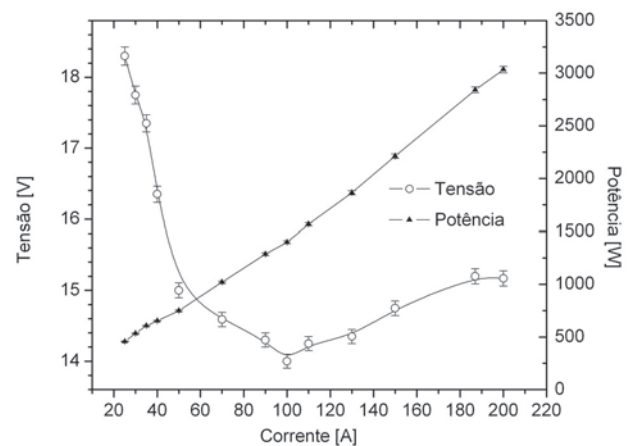


Figura 2. Característica estática de arco TIG para arco padrão [18].

2.2. Velocidade do Plasma

Com relação ao campo de velocidade do escoamento do jato de plasma formado no arco elétrico, uma importante verificação a ser feita refere-se à suposição do escoamento

como sendo laminar. Com relação a valores corretos para a velocidade do plasma, Snyder & Bentley [20], utilizando-se a técnica de espalhamento Thomson, mediram a velocidade do jato de plasma em 350 ± 40 m/s a uma posição de 1,2 mm abaixo da ponta do eletrodo em um arco de Ar puro a 200 A. Como forma de comparação, simulações para condições similares [21] apresentam a velocidade do plasma na mesma posição como sendo em torno de 390 m/s.

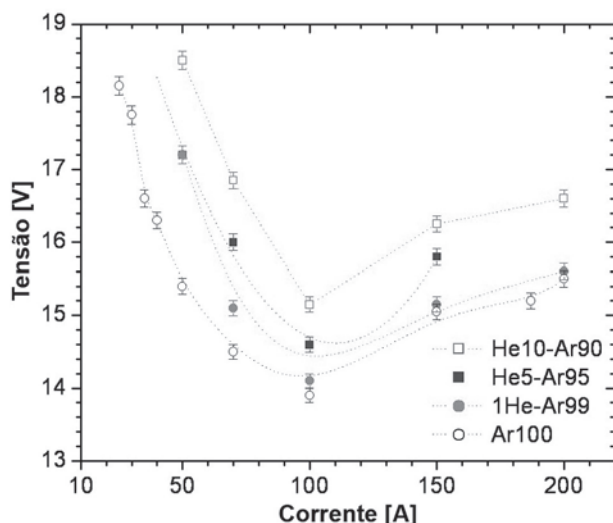


Figura 3. Características estáticas de arcos-padrão Ar-He [18].

Na mesma Ref. [21], o maior número de Reynolds R_e (Equação 1) para o arco de 100 A foi calculado como sendo 496 ($w = 238,9$ m/s; $L_a = 4$ mm; $\rho = 1,54 \cdot 10^{-2}$ kg/m³ e $\mu = 2,97 \cdot 10^{-5}$ kg/m·s) na posição central do mesmo. McKelliget & Szekely [22] e Wendelstorf et al. [11] afirmam que a transição do regime laminar-turbulento acontece no arco de soldagem TIG para valores de R_e acima de 500. Esta característica de transição confere ao arco TIG de Ar puro e 100 A características peculiares com relação à distribuição de cargas (em adição à sua localização na curva de característica estática do arco). Ressalta-se que a velocidade máxima do plasma tende a aumentar com o valor da corrente. Assim, arcos com correntes abaixo de 100 A devem apresentar comportamento laminar e acima deste valor apresentar comportamento turbulento. Ressalta-se que a transição laminar-turbulento não acontece em um ponto preciso, mas sim numa faixa e, portanto, os cálculos apresentados procuram mostrar a característica peculiar do arco de 100 A, que se encontrar no início da região de transição entre os dois modos de escoamento do jato de plasma.

$$R_e = \frac{w \cdot L_a \cdot \rho}{\mu} \quad (1)$$

onde, w é a máxima velocidade do plasma; L_a é o comprimento do arco; ρ é a densidade do plasma na posição de máxima velocidade e μ é a viscosidade dinâmica do plasma.

2.3. Deslocamento Lateral do Arco

Considera-se agora o efeito que a velocidade de soldagem possui na geometria e dimensões do arco elétrico, em especial na característica de deslocamento do arco (desvio da menor distância entre a ponta do eletrodo e a peça) na direção da soldagem. A relação entre o máximo deslocamento lateral de um arco em função da velocidade de soldagem foi calculada conforme procedimento descrito na Ref. [23], a partir da metodologia estabelecida por Maecker & Stablein [24]. Os resultados obtidos para diferentes correntes são mostrados na Figura 4, onde a faixa de valores de velocidade de soldagem (até 1 m/s) não é empregada na prática na soldagem TIG, mas facilita a observação das diferenças nos resultados de deslocamento em função da corrente.

Por esta figura, observa-se o posicionamento distinto do arco de 100 A, que apresenta menores valores de deslocamento e um comportamento mais linear que aqueles com parâmetros operacionais diferentes. Este efeito deve-se ao balanço entre a densidade do plasma, sua condutividade térmica e calor específico. Estas propriedades definem o plasma de forma macroscópica e são a base da definição da característica estática e velocidade do plasma descritos.

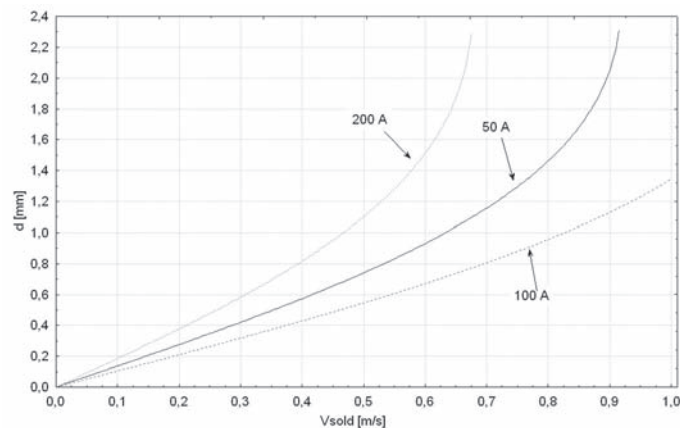


Figura 4. Deslocamento lateral do arco em função da velocidade de soldagem para arco de argônio puro com 5 mm de comprimento [23]

2.4. Dimensão do Arco próximo ao Ânodo

Com base nas medições realizadas na Ref. [25] e apresentadas na Figura 5, observa-se a variação da taxa de crescimento do raio do arco em condições flutuantes (F.C.) com o aumento da corrente. O raio do arco em condições flutuantes é definido como sendo a máxima extensão do seu campo eletromagnético medido por uma sonda eletrostática. Maiores detalhes são abordados na Ref. [23]. As tendências entre 50 e 70 A e entre 100 e 200 A são aproximadamente as mesmas (0,05 e 0,04 mm/A, respectivamente). Entretanto, entre 70 e 100 A há um maior gradiente, o que indica um aspecto de transição (0,12 mm/A).

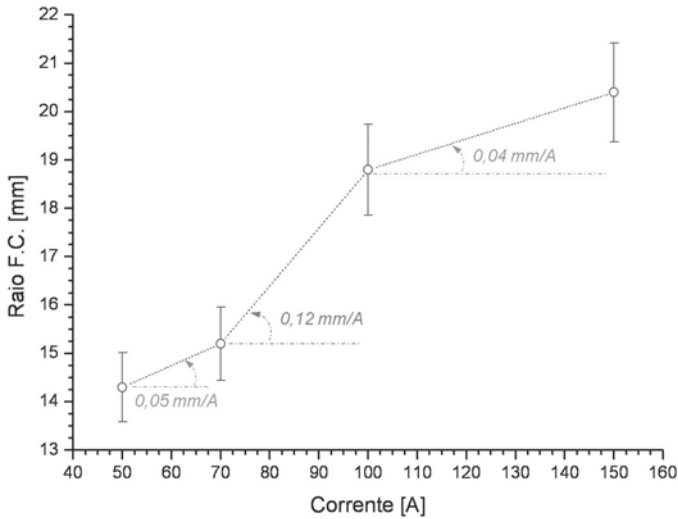


Figura 5. Raio do arco próximo ao ânodo para condição flutuante (F.C.) [17]

2.5. Queda de Tensão Anódica

Esforços teóricos, experimentais e numéricos têm procurado explicar a estrutura que se forma na bainha anódica (região anódica) que se forma próximo à peça de trabalho quando operando no processo TIG com eletrodo na polaridade negativa. Esta estrutura e seus mecanismos de captura de corrente e energia na superfície do ânodo desempenham papel fundamental na continuidade do arco elétrico e no desempenho do mesmo na fusão do metal de base [26].

Embora pareça ser uma conclusão intuitiva, largamente aceita e publicada em livros [9, 10], uma queda de tensão positiva próxima ao ânodo, como mostra a Figura 6, não é válida para toda a faixa operacional da soldagem. Alguns autores têm predito e medido quedas de tensão negativas próxima ao ânodo, ou seja, há uma inversão do potencial próximo à peça. O cálculo da inversão de potencial foi primeiramente descrito na Ref [27]. Isto porque os modelos utilizados para se estudar o arco elétrico se baseiam na magnetodinâmica [14], ou seja, tais modelos levam em consideração o aspecto coletivo das partículas que formam o plasma e o Equilíbrio Termodinâmico Local (LTE). Entretanto, a inversão de potencial é somente explicada quando se utiliza modelos que consideram o comportamento das partículas ou componentes do plasma. Experimentalmente a inversão de potencial foi medida e se encontra numa faixa de -2,1 a -1,4 V para arcos entre 100-250 A [26, 28, 29]. Esta medição é realizada com uso de sondas de Langmuir posicionadas de forma coaxial ao arco elétrico, ascendendo a partir do material de base, obtendo-se as curvas mostradas na Figura 7.

Com base nos resultados da literatura, é possível propor a Figura 8 para a distribuição de potencial através do arco TIG. Este resultado coloca, mais uma vez, o arco a 100 A numa posição de divisor de faixa operacional, isto é, em torno da corrente de 100 A, a tensão anódica muda de sinal.

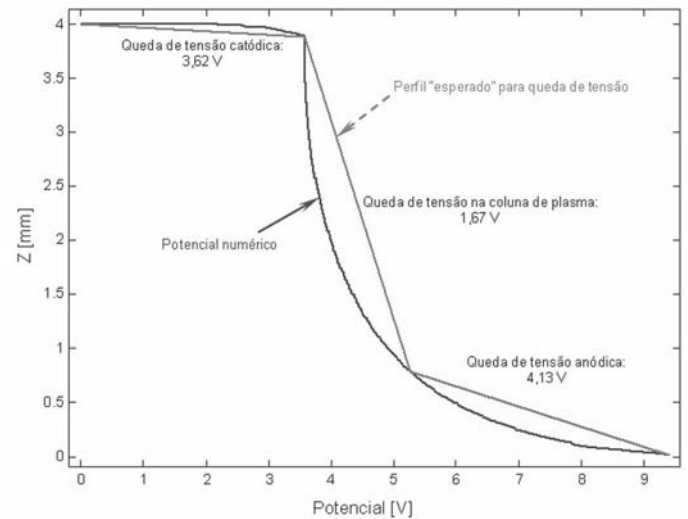


Figura 6. Perfil numérico da queda de tensão axial no centro do arco com 4 mm de comprimento, 100 A e argônio puro [21]

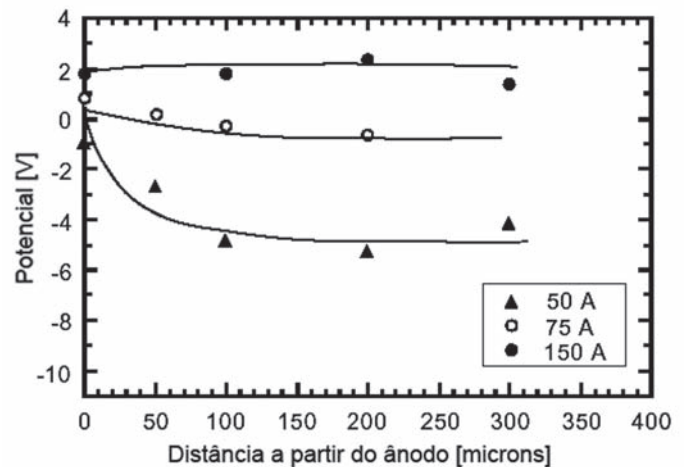


Figura 7. Variação do potencial através de arco elétrico (modificado de [26]).

3. Observações Finais

O arco TIG a 100 A e argônio puro se mostrou com aspecto de transição nas características apresentadas. Do ponto de vista tecnológico, poder-se-ia debater sobre a condição de robustez desta condição operacional no processo de soldagem. Isto porque, uma vez que se encontra na transição, flutuações na fonte de soldagem materiais, gás, etc, podem induzir a resultados diferentes. Não se pode afirmar que é uma condição operacional ruim, haja vista que é largamente empregada. Entretanto, cabe aqui um desafio ou questionamento sobre o assunto.

Os resultados aqui discutidos são fruto de estudos conduzidos sobre chapa de cobre resfriada, ou seja, sem os efeitos do material de base. Sem dúvida, o material da peça influencia na formação e manutenção do arco elétrico, podendo deslocar a faixa discutida, ao facilitar a ionização e estabilidade do arco. Uma vez que os vapores metálicos da chapa possuem potencial de ionização menor que o Ar, é esperado que esta faixa se desloque para menores valores de corrente (abaixo de 100 A). Desta forma, o

efeito de diferentes materiais de base no comportamento do arco é muito interessante. Está aí um desafio lançado. Além disso, há ainda características adicionais a serem investigadas como curvas de pressão e densidade de corrente.

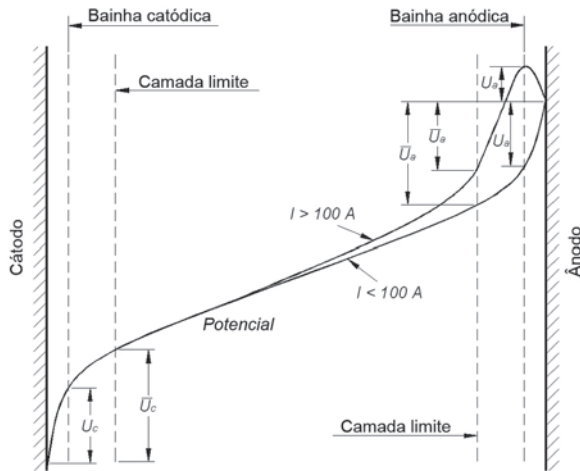


Figura 8. Proposição para a distribuição do potencial em arcos TIG, onde, U_a é a queda de tensão na bainha anódica/catódica e $U_{a,c}$ é a queda de tensão total nas regiões anódicas/catódicas [17]

4. Agradecimentos

O autor gostaria de agradecer à Capes, à Fapemig, ao CNPq e ao Laprosolda.

5. Referências Bibliográficas

- [1] CHOUDHURI, A.R. The Physics of Fluids and Plasmas: an Introduction for Astrophysicist. Cambridge University Press, 1998. 427 p.
- [2] SPRARAGEN, W. and B.A. LENGYEL. Physics of the Arc and the Transfer of Metal in Arc Welding. Welding Journal, p. 2s-42s, 1943, January.
- [3] ROLLASON, E.C. The Electric Arc in Welding. British Welding Journal, p. 71-72, 1960, February.
- [4] JACKSON, C.E. The Science of Arc Welding. Part III – What the Arc Does. Welding Journal, p. 225s-230s, 1960, June.
- [5] JACKSON, C.E. The Science of Arc Welding. Part I – Definition of Arc. Welding Journal, p. 129s-140s, 1960, April.
- [6] JACKSON, C.E. The Science of Arc Welding. Part II – Consumable-electrode Welding Arc. Welding Journal, p. 177s-190s, 1960, May.
- [7] QUIGLEY, M.B.C. Physics of the Welding Arc. Welding and Metal Fabrication, p. 619-626, 1977, December.
- [8] JONES, G.R. and M.T.C. FANG. The Physics of High-power Arcs. Rep. Prog. Phys., v.43, p. 1415-1465, 1980.
- [9] LANCASTER, J.F. The Physics of Welding. Pergamon Press & IIW, 1986. 340 p.
- [10] BOULOS, M.I., P. FAUCHAIS, and E. PFENDER. Thermal Plasmas: Fundamentals and Applications., Plenum Press, 1994. 452 p.
- [11] WENDELSTORF, J., et al., TIG and Plasma Arc Modelling: a Survey, in Mathematical Modelling of Weld Phenomena 3. 1997, The Institute of Materials. p. 848-897.
- [12] MURPHY, A.B. Thermal Plasmas in Gas Mixtures. J. Phys. D: Appl. Phys., v.34, p. R151-R173, 2001.
- [13] BENILOV, M.S. Theory and modelling of arc cathodes. Plasma Sources Sci. Technol., v.11, n. 3A, p. A49-A54, 2002.
- [14] VILARINHO, L.O. Welding Arc Modelling: a Survey. Soldagem & Inspeção, v.10, n. 1, p. 38-46, 2005.
- [15] RICHARDSON, I.M. Does Welding and Cutting Need Input from Plasma Science. Welding and Metal Fabrication, p. 76-77, 1996, February.
- [16] KOGELSCHATZ, U. Industrial Innovation Based on Fundamental Physics. Plasma Sources Sci. Technol., v.11, p. A1-A6, 2002.
- [17] VILARINHO, L.O. Characterisation of TIG Arc Structures Using Experimental Techniques. Report Cranfield University, 2002, p. 325
- [18] FANARA, C. and L.O. VILARINHO. Electrical Characterization of Atmospheric Pressure Arc Plasmas - an Overview. European Physical Journal D, v.28, p. 241-251, 2004.
- [19] IIW. TIG Arc Configuration for Temperature and Other Measurements. IIW, Study Group 212 Doc. No. 212-821-92. 1992, p. 1
- [20] SNYDER, S.C. and R.E. BENTLEY. A Measurement of Axial Velocity and Temperature in a Free-burning Arc using Thomson Scattering. J. Phys. D: Appl. Phys., v.29, p. 3045-3049, 1996.
- [21] VILARINHO, L.O. and A. SCOTTI. Caracterização de Arcos TIG via Análise Numérica. Soldagem & Inspeção, v.11, p. 200-207, 2006.
- [22] MCKELLIGET, J. and J. SZEKELY. Heat Transfer and Fluid Flow in the Welding Arc. Metallurgical Transactions A, v.17A, p. 1139-1148, 1986, July.
- [23] VILARINHO, L.O. As Dimensões do Arco Elétrico. Soldagem & Inspeção, v.Submetido, p. 10p., 2009.
- [24] MAECKER, H.H. and H.G. STABLEIN. What Keeps an Arc Standing in a Cross Flow? IEEE Trans. Plasma Sci., v.PS-14, n. 4, p. 291-299, 1986.
- [25] VILARINHO, L.O. and C. FANARA. A Modified Split-Anode Detector for the Study of the Anode Region of Atmospheric Pressure Arc Plasmas. Measurement Science & Technology, v.15, n. January, p. 67-74, 2004.
- [26] TANAKA, M. and M. USHIO. Observations of the Anode Boundary Layer in Free-burning Argon Arcs. J. Phys. D: Appl. Phys., v.32, p. 906-912, 1999.
- [27] SANDERS, N.A. and E. PFENDER. Measurement of Anode Falls and Anode Heat Transfer in Atmospheric Pressure High Intensity Arcs. J. Appl. Phys., v.55, n. 3, p. 714-722, 1984.
- [28] DINULESCU, H.A. and E. PFENDER. Analysis of the Anode Boundary Layer of High Intensity Arcs. J. Appl. Phys., v.51, n. 6, p. 3149-3157, 1980.
- [29] JENISTA, J., J.V.R. HEBERLEIN, and E. PFENDER. Numerical Model of the Anode Region of High-current Electric Arcs. IEEE Trans. Plasma. Sci., v.25, n. 5, p. 883-890, 1997.