

*Paulo V. Marques  
Paulo J. Modenesi  
Orlando B. Valente*

## Resumo

As propriedades físicas dos gases como densidade, condutividades térmica e elétrica, potenciais de ionização, entre outras, determinam, em grande parte, as características operacionais de arcos de soldagem. Estas propriedades podem variar bastante para diferentes gases. Assim, parâmetros como a tensão de operação, o calor gerado, o raio médio, o perfil térmico e a eficiência do arco, que por sua vez afetam a geometria (formato, largura e penetração) do cordão de solda, são fortemente influenciados pela composição química do gás de proteção usado.

Modelos físicos mais ou menos complexos e completos têm sido propostos para explicar e quantificar os efeitos de variações da composição química do gás de proteção no desempenho do arco de soldagem. Empiricamente, a influência da atmosfera do arco de soldagem e suas conseqüências na geometria do cordão são facilmente observadas. Contudo, a literatura tem registrado apenas as variações dos parâmetros operacionais e da geometria do cordão com a composição química do gás de proteção.

Neste trabalho foi feito um estudo ótico do arco de soldagem TIG, através de um sistema digital para captura e análise de imagens e registro dos parâmetros de operação. Variações na aparência e dimensões do arco e nos parâmetros elétricos foram observadas e os resultados foram relacionados com propriedades físicas dos diferentes gases e misturas usados.

## Abstract

Physical properties of gases as density, thermal and electric conductivity and ionization potential determine, to a great extent, the operational characteristics of welding arcs. These properties can vary strongly for different gases. As a result, arc voltage, heat output, mean radius, thermal profile, efficiency and other arc characteristics that influence bead geometry (shape, depth, etc.) depend on chemical composition of the shielding gas.

Complex physical models have being proposed to explain and to quantify the effects of shielding gas chemical composition on the welding arc performance. The influence of arc atmosphere can also be readily observed empirically.

However, only changes in arc operational parameters and weld bead geometry due variations in gas composition are well registered in literature.

In this work, an optical study of the gas tungsten arc is presented, based on a digital system for image capture and welding parameters register, during arc operation. The results were related to physical properties of gases and mixtures used and models in literature.

### Introdução

Segundo Jackson (1), o arco de soldagem consiste de uma descarga elétrica sustentada através de um gás ionizado, em alta temperatura, que gera calor suficiente para promover a fusão localizada de metais. No início do processo, isto é, na abertura do arco, uma quantidade relativamente pequena de átomos precisa ser ionizada para permitir a passagem inicial da corrente elétrica.

A partir daí, o calor gerado pela passagem da corrente deve ser suficiente para manter e aumentar o estado de ionização, estabilizando a descarga, e fundir o(s) eletrodo(s). Parte do calor gerado é perdida para o ambiente e parte transmitida para os eletrodos. Assim, as propriedades físicas dos gases presentes na atmosfera do arco (como potencial de ionização, condutividades elétrica, e térmica, densidade, calor específico e temperatura e entalpia de dissociação) bem como suas quantidades relativas devem ter um papel fundamental no comportamento deste.

Os fornecedores de gases para soldagem, de modo geral, têm desenvolvido misturas especiais binárias, ternárias ou com mais de três componentes para a soldagem de diferentes materiais ou em condições específicas de soldagem, otimizando as características operacionais do arco elétrico para cada situação em particular.

Modelos físicos mais ou menos complexos têm sido usados para estimar a influência de algumas destas propriedades no comportamento do arco elétrico de soldagem, particularmente nas suas características estáticas e dinâmicas e no seu rendimento e nas características geométricas do cordão de solda resultante(2,3).

De modo geral, estes estudos têm se baseado na observação dos parâmetros elétricos do arco durante a operação de soldagem, no estudo espectrográfico da radiação emitida, em medidas calorimétricas e na tomada de fotos ou filmagens de alta velocidade. Neste último caso, o objetivo principal tem sido a detecção de formação de pontos catódicos e o estudo do transporte de massa através do arco.

Neste trabalho foi feito um estudo ótico do arco elétrico de soldagem em diferentes atmosferas. Tomadas do arco em operação em diferentes atmosferas foram obtidas com um sistema digital para aquisição de imagens. Diferentes características destas imagens foram quantificadas e os resultados foram relacionados a informações bem conhecidas do desempenho do arco de soldagem em tais circunstâncias.

### **Procedimento Experimental**

#### **Gases e misturas utilizados**

Foram utilizados o argônio e o hélio puros, misturas binárias de argônio com hidrogênio, nitrogênio e hélio nos teores 2, 5 e 10% em volume do gás secundário e misturas de argônio com 25% em volume de hélio. Todos os gases foram adquiridos no mercado e tinham a pureza usual exigida na soldagem.

#### **Equipamentos utilizados**

A mistura foi feita em um misturador de gases industrial. A fonte de energia elétrica foi um equipamento industrial, com controle eletrônico. A tocha usada também foi uma comercial, com eletrodo de tungstênio com 2% thória, de 2,4 mm de diâmetro e ângulo da ponta de 90°. O sistema de aquisição de imagens constou de uma câmara de vídeo acoplada a um computador tipo PC Pentium equipado com sistema para aquisição e tratamento de imagens, todos de origem comercial. A tensão e a corrente de operação foram monitoradas utilizando-se um sistema digital dotado de um sensor de efeito Hall.

#### **Montagem experimental**

O arco elétrico foi aberto sobre um bloco de cobre refrigerado a água, com vazão constante, sem movimento relativo. O comprimento do arco foi mantido constante e igual a 3,0 mm durante todo o experimento, bem como a regulagem de corrente da máquina de solda. A figura 1 mostra um esquema de todo o aparato utilizado.

#### **Desenvolvimento dos experimentos**

Para cada atmosfera testada, o arco era aberto, esperava-se um tempo da ordem de 20 segundos para estabilização da operação. O valor médio da tensão e da corrente eram registrados. Três imagens do arco em cada condição eram adquiridas a intervalos de cerca de 5 segundos e o arco extinto, passando-se a uma nova atmosfera. Antes da abertura do arco em nova condição, o anodo de cobre era limpo com uma lixa fina e um lenço de papel. Quando o eletrodo apresentava sinais de desgaste, a ponta era recondicionada.

O tempo total de operação do arco em cada condição era da ordem de um minuto. Todos os testes com cada gás foram feitos na seqüência crescente de seu teor.

### Resultados e Discussão

A Tabela I mostra os valores medidos de tensão (V) e corrente (I) em todos os experimentos realizados. Observa-se, para todos os gases adicionados, um aumento aproximadamente linear da tensão medida com o teor do gás para valores abaixo de 10% (figura 2a). Nesta faixa, o hidrogênio teve o efeito mais pronunciado em termos da variação da tensão do arco, seguido do nitrogênio e do hélio (coeficientes de variação da tensão com a concentração de 0,6, 0,3 e 0,07 V/%, respectivamente).

O comportamento linear parece não se manter para maiores teores de gás adicionado, pelo menos para o hélio (figura 2b). Este comportamento linear também não foi observado, para misturas Ar-H<sub>2</sub> contendo menos de 10% H<sub>2</sub>, na soldagem TIG de um aço inoxidável austenítico(4) (figura 3). Esta diferença deve estar associada com as diferenças nas condições operacionais, em particular com o uso de um ânodo não fusível em um caso (Cu refrigerado com água) e um fusível no outro (aço inoxidável).

A figura 4 mostra imagens do arco com as diversas misturas estudadas. As imagens sugerem, em todos os casos, uma redução da largura (principalmente próximo da região anódica) e da luminosidade do arco com o aumento do teor de qualquer dos gases adicionados ao argônio. Uma redução similar na largura do arco TIG, quando o gás de proteção foi mudado de argônio para nitrogênio, foi observada por Milner e colegas(5). No teste com proteção de He puro, este efeito foi radical, não se conseguindo observar, com a câmara CCD usada, a imagem do arco. Estas mudanças na imagem devem ter sido causadas (a) por alterações reais na geometria do arco e (b) por mudanças na qualidade da radiação emitida pelo arco em relação à sensibilidade da câmara CCD usada para registrar as imagens do arco. A figura 5 mostra uma curva de sensibilidade de uma câmara CCD típica.

O espectro luminoso do hélio é caracterizado por linhas de emissão entre 587 e 728 nm (laranja-vermelho) e abaixo de 400 nm (figura 6), as quais parecem estar localizadas além de região de ótima sensibilidade da câmara CCD usada. Assim, a imagem do arco com proteção rica em hélio deve ter sido afetada, de forma importante, por este efeito. Esta característica poderia ser usada no desenvolvimento de uma técnica relativamente simples para o estudo da operação e desgaste de eletrodos de tungstênio com um equipamento pouco sofisticado.

O mesmo efeito pode ter ocorrido no caso da adição dos outros gases (H<sub>2</sub> e N<sub>2</sub>). Contudo, estes apresentam algumas raias espectrais de alta intensidade na região de maior sensibilidade da câmara CCD, o que deve reduzir a importância deste efeito (figura 6). Em particular, o nitrogênio, que parece estar associado com as maiores alterações de forma (figura 4), apresenta um grande número de raias de emissão nesta região.

A figura 7 ilustra as mudanças de forma observadas no arco quando o nitrogênio foi adicionado no gás de proteção. Nesta figura, a imagem foi processada, reduzindo-se os seus níveis de cinza para realçar as mudanças de forma no arco. Observa-se, mesmo para adições de apenas 2% de N<sub>2</sub>, uma redução da largura do arco, particularmente junto à região anódica, que se torna mais acentuada quando o teor de N<sub>2</sub> é aumentado.

A figura 8 compara a influência das diferentes adições usadas no gás de proteção no formato da imagem do arco. O mesmo efeito geral (redução de tamanho e de luminosidade) é observado para todos os gases, sendo mais intenso para as adições de nitrogênio e menos para o hidrogênio. No caso deste gás, contudo, observa-se, ainda, a formação de um ponto anódico na raiz do arco junto ao bloco de cobre.

As diversas imagens foram processadas em um programa de análise de imagens para a determinação do raio anódico do arco (definido como o raio máximo do arco e localizado próximo do anodo) e da sua área de projeção. Para a determinação desta área, mediu-se, arbitrariamente, a área de cada imagem compreendida por todos os pontos (pixels) de intensidade (valor) entre 128 e 255. Em função do elevado contraste das imagens, pequenas variações no valor inferior deste limite, não afetavam apreciavelmente o resultado. A figura 9 mostra as mudanças determinadas nestes parâmetros (diâmetro e área do arco) em função do teor dos gases adicionados. Observa-se, para ambos os parâmetros, uma redução aproximadamente linear das dimensões do arco para a adição do hélio, enquanto que, para os outros gases, esta variação não foi linear. Para estes, as dimensões do arco aparentemente tendem a se estabilizar para uma quantidade de gás adicionado suficientemente alta.

Pode-se tentar relacionar estas variações de tensão, luminosidade, área e diâmetro do arco às propriedades físicas dos gases utilizados (Tabela II). O potencial de ionização não pode ser diretamente relacionado à tensão de operação. Na verdade, a tensão de operação tendeu a aumentar com o teor do gás na mistura na ordem inversa do potencial de ionização, ou seja, quanto maior o potencial de ionização, mais suave é a variação da tensão de operação com o teor do gás.

Entretanto, embora não tenha sido quantificado observou-se que a dificuldade de abertura do arco parece ser influenciada pelo potencial de ionização.

Em condições estacionárias, o calor gerado na coluna do arco (considerando-se somente o de origem elétrica) é igual ao calor perdido por diferentes mecanismos, isto é(2):

$$E^2 \sigma = -\frac{1}{r} \frac{d}{dr} \left( \kappa r \frac{dT}{dr} \right) + R(T) + H(T)$$

onde E é o campo elétrico na coluna,  $\sigma$  e  $\kappa$  são as suas condutividades elétrica e térmica, respectivamente, T é a temperatura, r é a distância ao eixo central da coluna e R(T) e H(T) são, respectivamente, as perdas por radiação e convecção. Todos os termos da equação (1) dependem, de forma mais ou menos complexa, da temperatura e da composição do arco e, no caso da convecção, das condições de fluxo do plasma na coluna do arco.

Assim, a solução analítica desta equação é basicamente impossível, existindo algumas soluções numéricas parciais(6). Uma avaliação qualitativa desta equação é, contudo, possível e capaz de ajudar no entendimento do efeito da composição do gás de proteção nos características do arco. Para um dado comprimento de arco ( $l_a$ ) e nível de corrente, a tensão do arco é dada por:

$$V = V_A + V_C + E \cdot l_a$$

onde  $V_A$  e  $V_C$  são, respectivamente, as tensões nas regiões de queda anódica e catódica. Supondo que  $V_A$  e  $V_C$  não sejam afetadas de forma importante pela composição do gás de proteção (o que pode não ser verdade(7)), a tensão do arco será afetada apenas por mudanças em E, o qual seria determinado pelo balanço de energia dado pela equação (1), que teria a seguinte forma geral:

$$E = \sqrt{\frac{C(T) + R(T) + H(T)}{\sigma}}$$

onde C(T) representa as perdas por condução térmica.

A radiação emitida pelo arco é constituída por dois componentes: a radiação característica, que depende fortemente da composição do gás (figura 6), e a radiação contínua, fortemente dependente da temperatura.

Richardson(8), através de um cálculo simplificado, estima perdas por radiação na coluna do arco TIG de cerca de 10% (3% da energia total do arco).

As perdas por convecção estariam associadas com a absorção do gás frio no jato de plasma e seu aquecimento no arco, estando, assim, relacionadas com o valor do calor específico do gás (ou de sua variação de entalpia). Ainda segundo Richardson(8), as perdas por convecção podem atingir cerca de 30-40% da potência gerada na coluna.

As perdas por condução seriam responsáveis pelo restante das perdas de energia no arco, isto é, cerca de 50-60% e dependeriam fortemente do valor da condutividade térmica do gás. Assim, o campo elétrico, e portanto a tensão do arco, tenderiam a aumentar para gases de maior condutividade térmica, maior calor específico e de menor condutividade elétrica.

Os valores das propriedades mostradas na tabela II se referem, em geral, à temperatura ambiente, não sendo, portanto, apropriadas para as condições encontradas no arco TIG (temperaturas da ordem de 10<sup>4</sup> K). Dados de diversas fontes(2,9-11) sugerem que, a altas temperaturas, a condutividade térmica varia, de forma crescente, na seguinte ordem:

Ar, N, He H e a entalpia de aquecimento (conteúdo calorífico): Ar, He, H, N, sendo os valores relativos aos gases biatômicos (nitrogênio e o hidrogênio) muito superiores aos dos gases nobres. As condutividades elétricas do argônio e do nitrogênio são muito similares (embora fortemente dependentes da temperatura) entre 10.000 e 20.000 K. Por outro lado, o hélio tende a apresentar uma condutividade cerca de 10 vezes menor que o argônio na mesma faixa de temperaturas(2). Esta diferença torna-se, contudo, muito menor, cerca da metade, quando se considera misturas Ar-He com até 70% de hélio.

### Conclusões

A tensão de operação de arcos de soldagem TIG varia com a composição da atmosfera usada na proteção gasosa, aumentando quando H<sub>2</sub>, N<sub>2</sub> ou He são adicionados ao argônio. Esta variação pode ou não ser linear, dependendo dos gases e das proporções de mistura e das condições operacionais. Uma redução da largura e da luminosidade do arco é observada com o aumento do teor de qualquer dos gases utilizados quando adicionados ao argônio. Mudanças na forma do arco são mais pronunciadas com a adição de nitrogênio. Adições de hidrogênio ao argônio acima de um determinado teor (em torno de 10%, neste trabalho) causam a formação de ponto anódico.

Foi previsto, através de um modelo teórico, que a tensão do arco, tende a aumentar para gases de maior condutividade térmica, maior calor específico e de menor condutividade elétrica, o que concorda com os resultados experimentais obtidos.

### Bibliografia

1. JACKSON, C. E. The science of arc welding. Welding Journal 39(3-5), 1960, p. 129s- 140s, 177-190s, 225s-230s.
2. LANCASTER, J. F. The physics of welding. Oxford: Pergamon Press, 1986. 340p.
3. MODENESI, P. J. Introdução à física do arco elétrico e suas aplicação na soldagem. Belo Horizonte: EMT/UFMG, 1995, 80p. (Apostila)
- 4 OLIVEIRA, L. C. de, Soldabilidade de Aços Inoxidáveis Austeníticos com Gases Especiais, Relatório de Iniciação Científica, EMT/UFMG, 1996, 30 p.
- 5 MILNER, D.R. et alli. Arc characteristics and their significance in welding. British Welding Journal, feb./1960. p. 73-88.
6. KOVITYA, P. & LOWKE, J.J. Two-Dimensional Analysis of Burning Arcs in Argon, J. Phys. D., 18, 1985, p. 53-70.
7. MODENESI, P.J., NIXON, J. Arc Instability Phenomena in GMA Welding, Welding Journal, 73(9), 1994, p. 219s-224s.
8. RICHARDSON, I.M. Introduction to Arc Physics. Cranfield: School of Industrial Science - Cranfield Institute of Technology, 1989, 42 p. (Apostila)
9. AHLBERG, K. AGA Gas Hadbook, Lidingö: AGA, 1985.
10. AMERICAN WELDING SOCIETY. Welding Handbook, v.1. Miami: AWS, 1987. 8 ed.
11. CARVALHO, J. L. R. et alli, Dados Termodinâmicos para Metalurgistas, EMT/UFMG, 1977, 392 p.



**Tabela I - Valores de tensão e corrente medidos**

Teor (% vol.)	0		2		5		10		25		100	
Gás secundário	V (V)	I (A)	V (V)	I (A)	V (V)	I (A)	V (V)	I (A)	V (V)	I (A)	V (V)	I (A)
Nitrogênio	12,6	153	13,5	153	14,2	153	15,7	153				
Hidrogênio	12,6	153	13,7	153	15,8	153	18,5	153				
Hélio	12,6	153	12,7	153	12,9	152	13,1	152	13,4	152	19,5	152

**Tabela II - Propriedades físicas de alguns gases usados em soldagem**

Propriedade	Gás	Argônio	Hélio	Hidrogênio	Nitrogênio
Potencial de ionização (a 21°C) [V]	(I)	15,75	24,58	13,60	14,54
	(II) [V]	27,62	54,40	--	29,61
Densidade (a 21°C) [kg/m <sup>3</sup> ]		1,67	0,17	0,084	1,17
Condutividade térmica (a 21°C) [mW/cm°C]		162	1484	1682	241
Calor específico (a 21°C) [kJ/kg°C]		0,52	5,19	14,26	1,04
	[kJ/m <sup>3</sup> °C]	0,868	0,882	1,198	1,217
Energia de dissociação [kJ/mol]		--	--	430,0	940,0
Temperatura de dissociação* [K]		--	--	4580	8300

(\*) 90 % de dissociação(5)

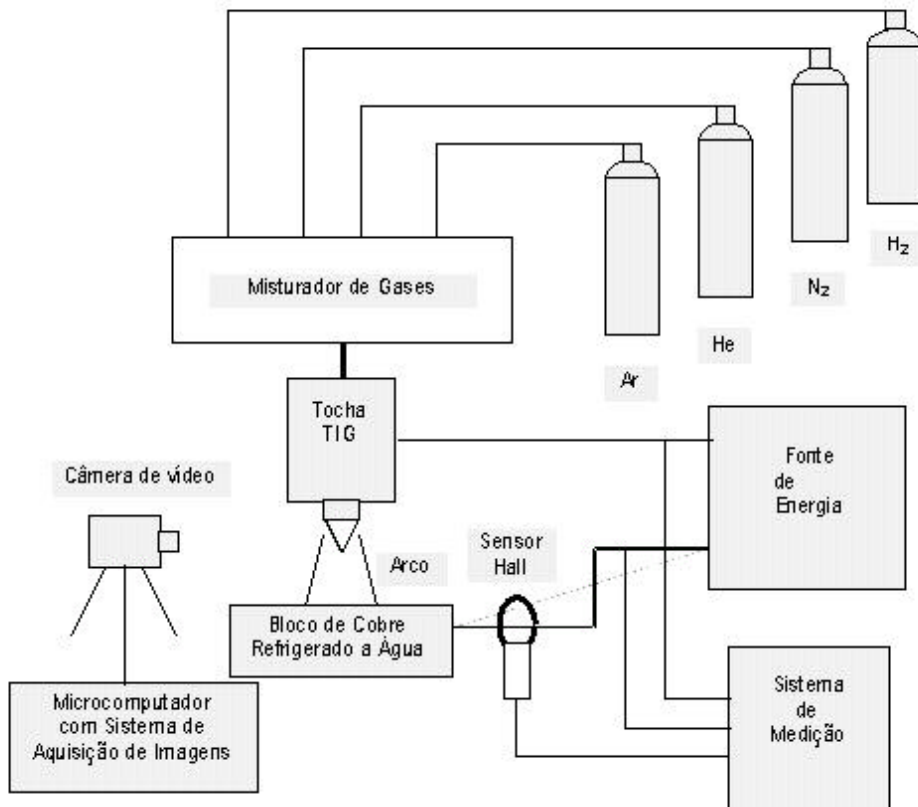


Figura 1 - Montagem experimental.

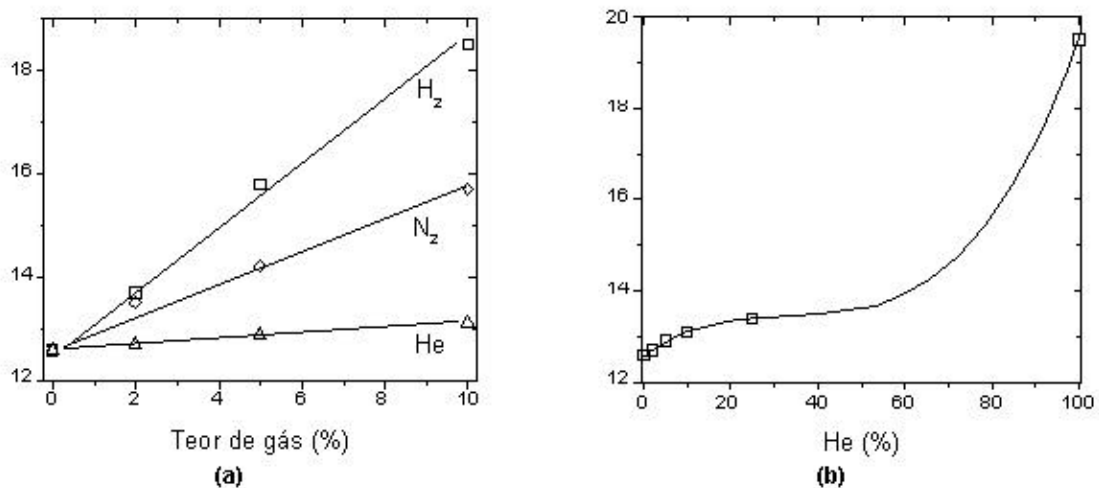


Figura 2 - Variação da tensão do arco com teor de gás misturado ao argônio. (a) H<sub>2</sub>, N<sub>2</sub> e He (0 a 10%), (b) He (0 a 100%).

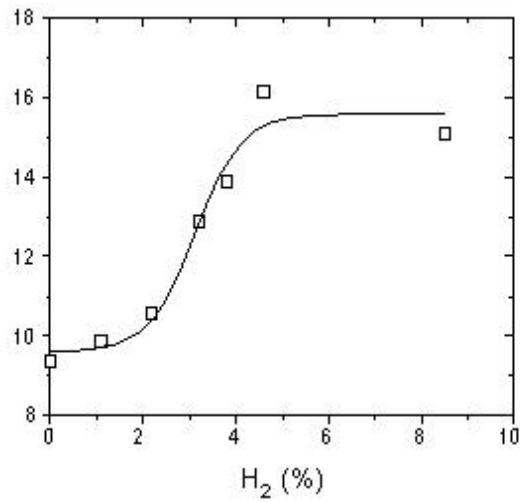


Figura 3 - Variação da tensão do arco no soldagem TIG de um aço inoxidável austenítico em função do teor de hidrogênio no gás de proteção(4).

% → Gás	0	2	5	10	25	100
H <sub>2</sub>						
He						
N <sub>2</sub>						

Figura 4 - Imagens do arco.

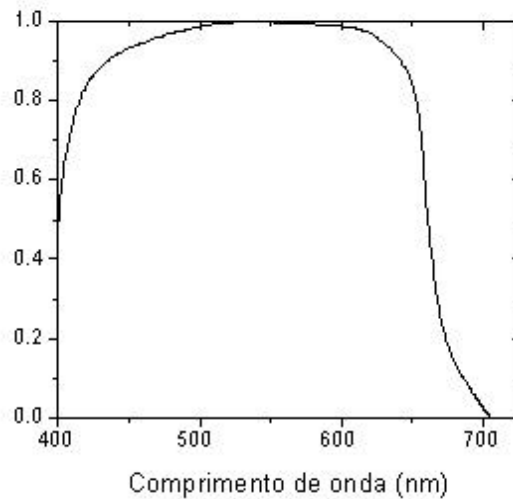


Figura 5 - Curva típica de sensibilidade de uma câmera CCD com filtro IV.

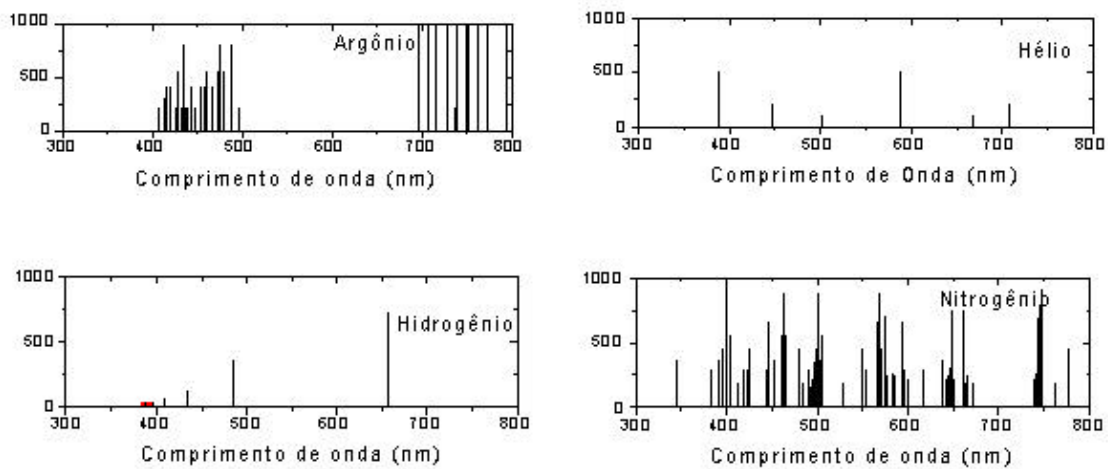


Figura 6 - Espectros esquemáticos de emissão, na região da luz visível, dos gases estudados.

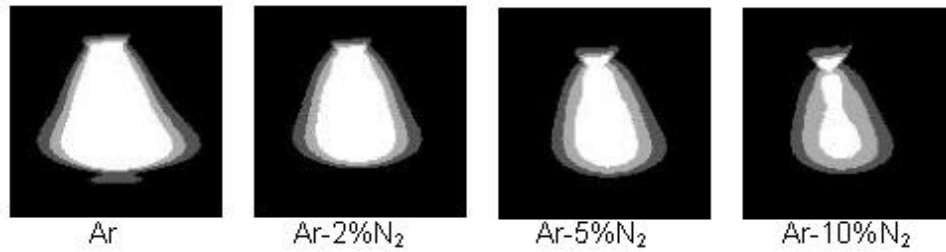


Figura 7 - Mudanças de forma do arco em função do teor de nitrogênio no gás de proteção.

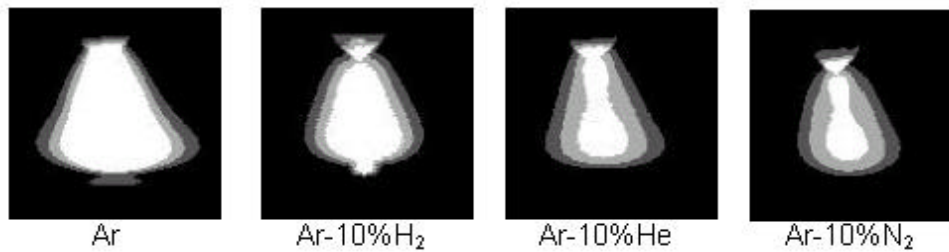


Figura 8 - Mudanças de forma do arco em função do tipo de adição ao gás de proteção.

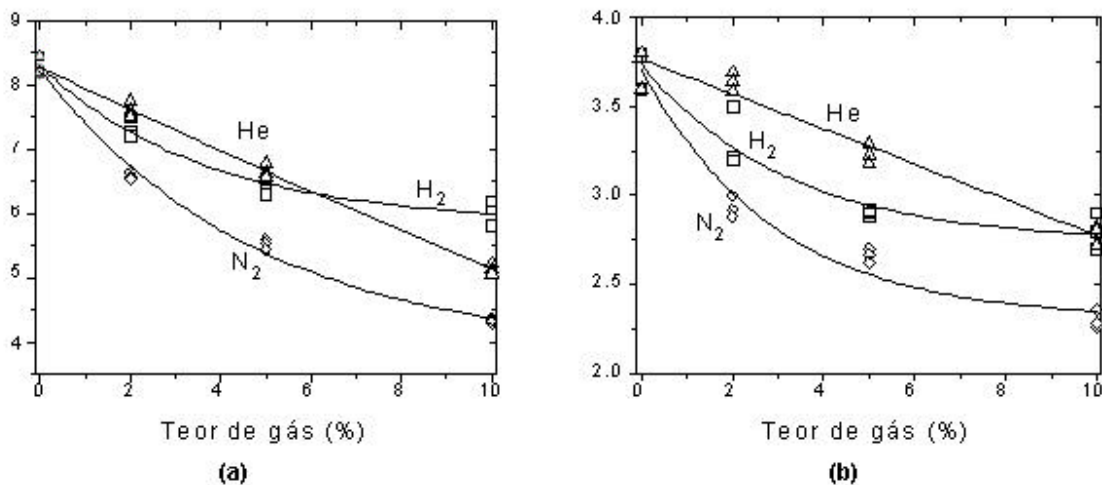


Figura 9 - Variação da (a) área do arco e (b) do diâmetro anódico com teor de gás misturado ao argônio.