

Características del arco de soldadura TIG en diferentes atmósferas

I parte^(*)

P. V. Marques* y P. J. Modenesi**

Resumen

Las propiedades físicas de los gases como densidad, conductividades térmica y eléctrica, potencial de ionización, entre otras, determinan en gran parte las características operacionales de los arcos de soldadura. Estas propiedades pueden variar bastante para diferentes gases. Así, parámetros como la tensión de la operación, el calor generado, el radio medio, el perfil térmico y el rendimiento del arco, que a su vez afectan la geometría (forma, anchura y penetración) del cordón de soldadura, están muy influidos por la composición química del gas de protección utilizado. Se han propuesto modelos físicos más o menos complejos y completos para explicar y cuantificar los efectos de las variaciones de composición química del gas de protección sobre el comportamiento del arco de soldadura. Empíricamente, la influencia de la atmósfera del arco de soldadura y sus efectos sobre la geometría del cordón pueden ser fácilmente predecibles. Sin embargo, en la bibliografía no aparecen referencias aparte de las referidas a variaciones de los parámetros de la operación y de la geometría del cordón en relación con la composición química del gas de protección. En este trabajo se presenta un estudio óptico del arco de soldadura TIG llevado a cabo mediante un sistema digital para toma y análisis de las imágenes y registro de los parámetros de la operación. Se observaron variaciones en el aspecto y dimensiones del arco y en los parámetros eléctricos, y los resultados se relacionaron con las propiedades físicas de los diferentes gases y mezclas empleados, con las variaciones bien conocidas de la geometría del cordón resultante y con las previsiones de los modelos teóricos.

Palabras clave

Soldadura TIG. Arco eléctrico. Gas de protección.

GTA arc characteristics in different atmospheres

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 been 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 to variations in gas composition are well registered in the 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.

Keywords

GTA welding. Electric arc. Shielding gas.

1. INTRODUCCIÓN

Según Jackson^[1], el arco de soldadura consiste en una descarga eléctrica sostenida a través de un gas ionizado, en alta temperatura, que genera un calor suficiente para promover la fusión localizada de metales. En el inicio del proceso, esto es cuando se

abre el arco, es necesario que una cantidad relativamente pequeña de gas se ionice para permitir el paso inicial de la corriente eléctrica. A partir de ahí, el calor generado por el paso de la corriente debe ser suficiente para mantener y aumentar el estado de ionización, estabilizando la descarga, y fundiendo el o los electrodos. Parte del calor generado

(*) Trabajo recibido el día 15 de julio de 1998 y aceptado en su forma final el 29 de septiembre de 1999.

(*) Físico, Dr. Prof. Adjunto.

(**) Eng^o Metalurgista, PhD. Prof. Adjunto. Dpto. de Engenharia Metalúrgica e de Materiais, UFMG. Rua Espírito Santo, 35 - 2º andar - Centro. 30.160-030. Belo Horizonte/ MG (Brasil).

se pierde en el ambiente y parte se transmite a los electrodos. Así, las propiedades físicas de los gases presentes en la atmósfera del arco (como potencial de ionización, conductividad eléctrica y térmica, densidad, calor específico y temperatura y entalpía de disociación) y sus proporciones relativas deben tener un papel fundamental en el comportamiento del mismo.

Los suministradores de gases para soldadura, de modo general, han desarrollado mezclas especiales binarias, ternarias o con más de tres componentes para el soldeo de los diferentes materiales o para utilizar en condiciones específicas de soldadura, optimizando las características operacionales del arco para cada situación en particular.

Modelos físicos más o menos complejos han sido utilizados para estimar la influencia de alguna de estas propiedades en el comportamiento del arco eléctrico del soldeo, particularmente en las características geométricas del cordón de soldadura resultante^[2 y 3].

De modo general, estos estudios se han basado en la observación de los parámetros eléctricos del arco durante la operación de soldeo, en el estudio espectrográfico de la radiación emitida, en medidas calorimétricas y en la toma de fotos o filmación a alta velocidad. En este último caso, el objetivo principal ha sido la captación de la formación de puntos catódicos y el estudio del transporte de masa a través del arco.

En este trabajo, se llevó a cabo un estudio óptico del arco de soldadura en diferentes atmósferas. Durante esta operación se hicieron tomas del arco con un sistema digital de captación de imágenes. Diferentes características de estas imágenes fueron cuantificadas y los resultados se relacionaron con informaciones bien conocidas del comportamiento del arco de soldadura en circunstancias similares.

2. PROCEDIMIENTO EXPERIMENTAL

2.1. Gases y mezclas utilizados

Se utilizaron argón y helio puros, mezclas binarias de argón con hidrógeno y helio en 2,5 y 10 % vol. del gas secundario y mezclas de argón con 25 % vol. de helio. Todos los gases se adquirieron en el mercado y tenían la pureza usual exigida en el soldeo.

2.2. Equipos utilizados

La mezcla se hizo en un mezclador de gases industrial. La fuente de energía fue un equipo industrial,

con control electrónico. La pistola de soldeo utilizada fue comercial, con electrodo de wolframio con 2 % Th de torio de 2,4 mm de diámetro y ángulo de punta de 90°. El sistema de toma de imágenes estaba formado por una cámara Hitachi de vídeo en blanco y negro tipo CCD Modelo KP-M1 acoplado a un ordenador tipo PC Pentium equipado con un sistema para toma y tratamiento de imágenes, modelo DT 3155 "Data translation" capaz de grabar archivos de imagen de 640 × 480 *pixels* con 256 niveles de gris. Para reducir la intensidad luminosa y filtrar la radiación ultravioleta se colocó entre la cámara y el arco una lente convencional de soldadura número 10. La tensión y la corriente de la operación se controlaron mediante un monitor utilizando un sistema digital dotado de un sensor de efecto Hall. Los archivos de los valores instantáneos de voltaje y corriente de soldeo se procesaron para obtener la media de operación.

2.3. Montaje experimental

El arco eléctrico se abrió sobre un bloque de cobre refrigerado con agua, con vacío constante, sin movimiento relativo. La longitud del arco se mantuvo constante e igual a 3,0 mm durante todo el experimento, así como la regulación de la corriente de la máquina de soldadura. La figura 1 muestra un esquema de todo el aparato utilizado.

2.4. Desarrollo de los experimentos

Para cada atmósfera ensayada, una vez iniciado el arco, se esperaba un tiempo del orden de 20 s para estabilizar la operación. Se registró el valor medio

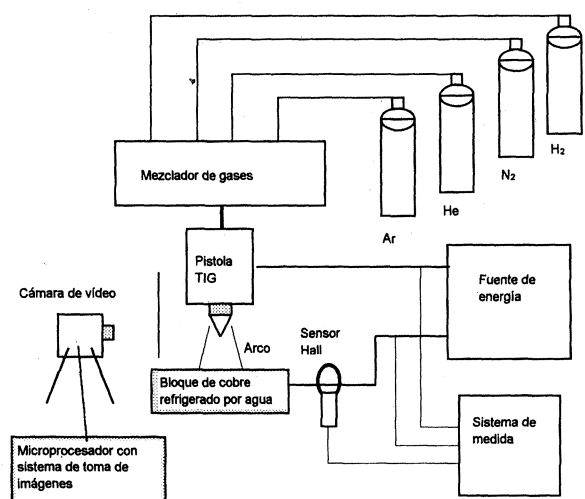


Figura 1. Montaje experimental.

Figure 1. Experimental assembly.

de la tensión y de la intensidad de corriente. Se tomaron tres imágenes del arco para cada condición a intervalos de 5 s y el arco se apagaba antes de pasar a una nueva atmósfera. Antes del inicio del arco en la nueva condición se limpiaba el bloque de cobre con una lija fina y papel absorbente. Cuando el electrodo presentaba señales de desgaste se reacondicionaba la punta. El tiempo total de operación del arco en cada condición era del orden de 1 min. Todos los ensayos con cada gas se iniciaron en secuencia creciente de su porcentaje.

3. RESULTADOS Y DISCUSIÓN

La tabla I muestra los valores medios de la tensión (V) y de la intensidad de corriente (I) en todos los experimentos realizados. Se observa, para todos los gases añadidos, un aumento aproximadamente lineal de la tensión medida con el contenido del gas para valores por debajo del 10 % (Fig. 2a). En este intervalo, el hidrógeno tuvo un efecto más pronunciado en cuanto a la variación de la tensión del arco, seguido del nitrógeno y el helio (coeficientes de la variación de la tensión con la concentración de 0,6, 0,3 y 0,07 V/%, respectivamente). El comportamiento lineal parece no mantenerse para contenidos mayores del gas añadido, al menos para el helio (Fig. 2b). Este comportamiento lineal tampoco se observó para las mezclas Ar-H₂ que contenían menos del 10 % H₂, en el soldeo TIG de un acero inoxidable austenítico^[4] (Fig. 3). Esta diferencia debe asociarse con las diferencias en las condiciones operacionales, en particular con el uso de un ánodo no fusible en un caso (cobre refrigerado con agua) y uno fusible en el otro (acero inoxidable).

La figura 4 muestra imágenes del arco con las diferentes mezclas estudiadas. Las imágenes sugieren en todos los casos una reducción de la longitud (principalmente en las proximidades de la región anódica) y una luminosidad del arco a medida que aumenta el contenido de cualquiera de los gases

añadidos al argón. Cuando el gas de protección se cambió de argón a nitrógeno Milner *et al.*^[5] observaron una reducción similar en la longitud del arco TIG. En el ensayo con protección de helio puro, este efecto fue radical, no consiguiéndose observar, con la cámara CCD empleada, la imagen del arco. Estos cambios en la imagen deben haber sido

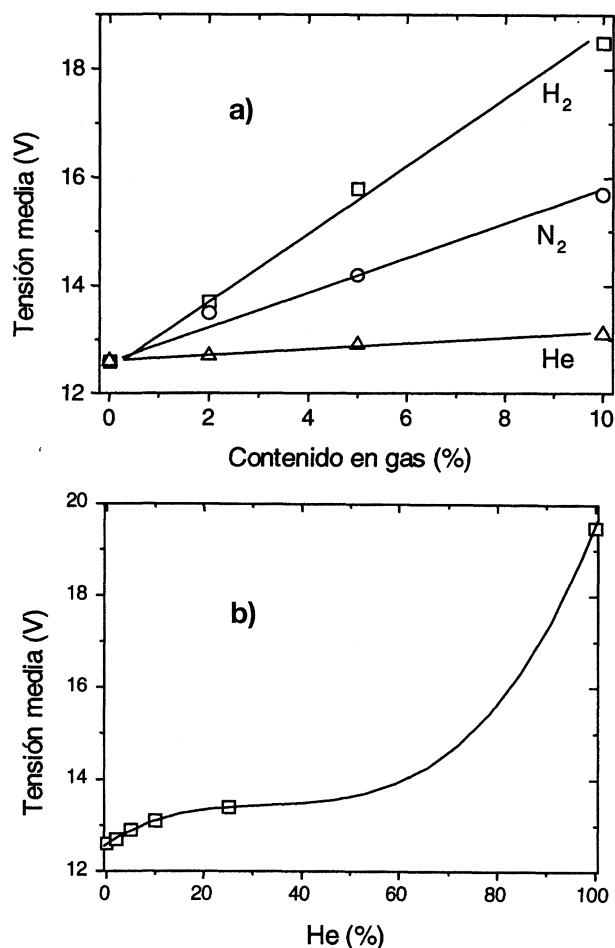


Figura 2. Variación de la tensión del arco para las diferentes adiciones de helio a las mezclas de gas de soldadura. a) H₂, N₂ y He (0 a 10 %); b) He (0 a 100 %).

Figure 2. Voltage arc variation for the different helium additions to the welding gas mixtures. a) H₂, N₂, and He (0 a 10 %); b) He (0 a 100%).

Tabla I. Valor de la tensión (V) y de la intensidad de corriente (I) medidos para las diferentes mezclas de gas

Table I. Voltage (V) and current (I) values measured for the different gas mixtures

	Contenido del gas secundario (% vol)											
	0		2		5		10		25		100	
	V (V)	I (A)	V (V)	I (A)	V (V)	I (A)	V (V)	I (A)	V (V)	I (A)	V (V)	I (A)
Nitrógeno	12,6	153	13,5	153	14,2	153	15,7	153				
Hidrógeno	12,6	153	13,7	153	15,8	153	18,5	153				
Helio	12,6	153	12,7	153	12,9	152	13,1	152	13,4	152	19,5	152

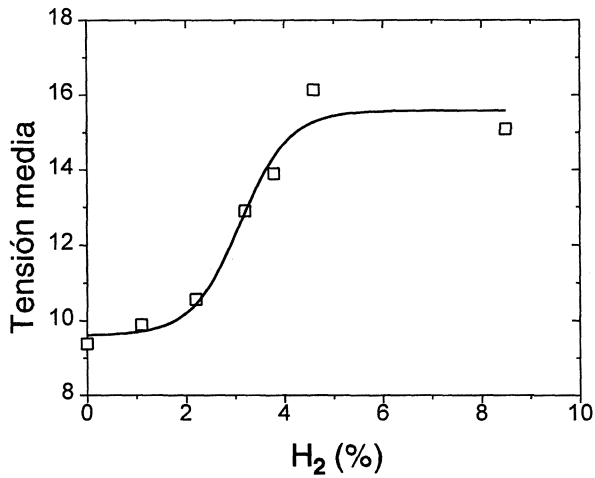


Figura 3. Variación de la tensión del arco en el soldo TIG de un acero inoxidable austenítico en función del contenido de hidrógeno en el gas de protección.

Figure 3. Arc voltage variations during TIG welding of austenitic stainless steel in relation to hydrogen content of the shielding gas.

provocados: a) por alteraciones reales en la geometría del arco y b) por cambios en la calidad de la radiación emitida por el arco en relación con la sensibilidad de la cámara CCD utilizada para registrar sus imágenes. La figura 5 muestra una curva de sensibilidad de una cámara CCD típica.

El espectro luminoso del helio se caracteriza por líneas de emisión entre 587 y 728 nm (naranja-rojo) y por debajo de 400 nm (Fig. 6), las cuales parecen estar localizadas más allá de la región de

sensibilidad óptima de la cámara CCD utilizada. Así, la imagen del arco con protección rica en helio debe verse afectada de forma importante por este efecto. Esta característica podría ser utilizada en el desarrollo de una técnica relativamente simple para el estudio de la operación de desgaste de los electrodos de wolframio con un equipo poco sofisticado. El mismo efecto pudo ocurrir en el caso de la adición de otros gases (H₂ y N₂). Sin embargo, estos presentan algunas rayas espectrales de alta intensidad en la región de mayor sensibilidad de la cámara CCD, lo que debe reducir la importancia de este efecto (Fig. 6). En particular, el nitrógeno, que parece estar asociado con las mayores alteraciones de forma (Fig. 4), presenta un gran número de rayas de emisión en esta región.

La figura 7 ilustra los cambios de forma observados en el arco cuando se añade nitrógeno al gas de protección. La imagen de esta figura, se procesó para reducir los niveles de gris y realzar los cambios de forma del arco. Así mismo, se observa para reducciones de sólo un 2 % N₂, una reducción en la longitud del arco, especialmente próximo de la región anódica, que se hace más acentuada cuando se aumenta el contenido de N₂.

La figura 8 compara la influencia de las diferentes adiciones empleadas en el gas de protección sobre la forma de la imagen del arco. El mismo efecto general (reducción del tamaño y de la luminosidad) se observa para todos los gases, siendo

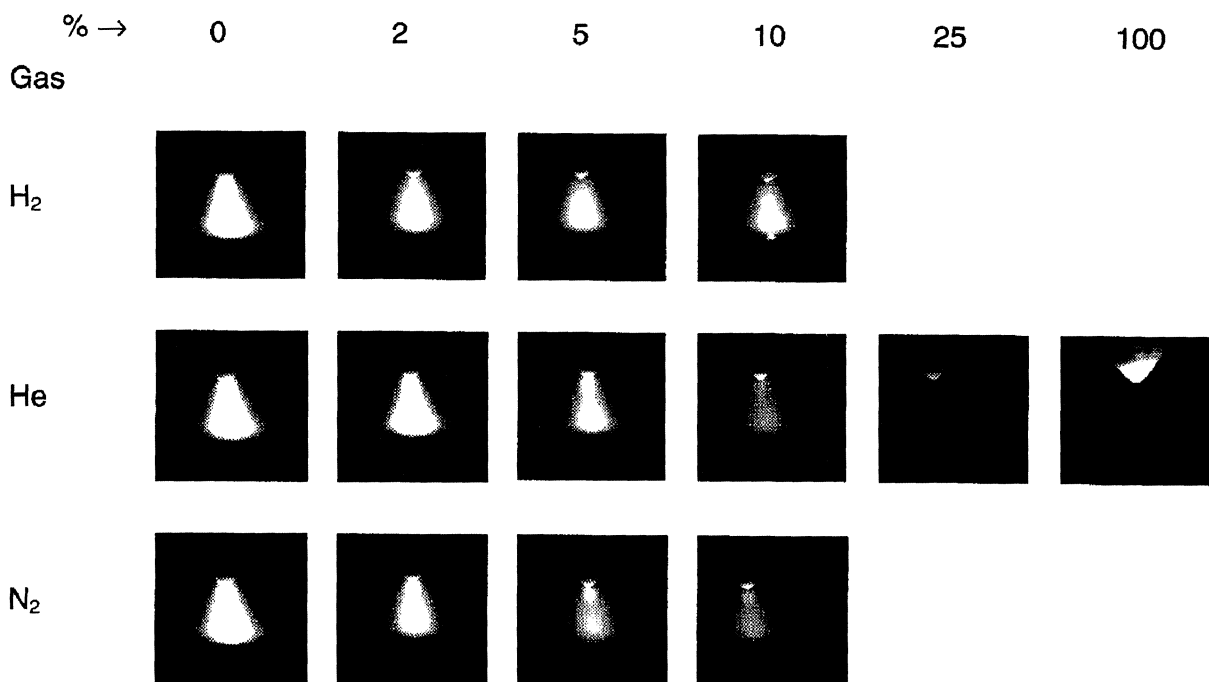


Figura 4. Imágenes del arco.

Figure 4. Arc images.

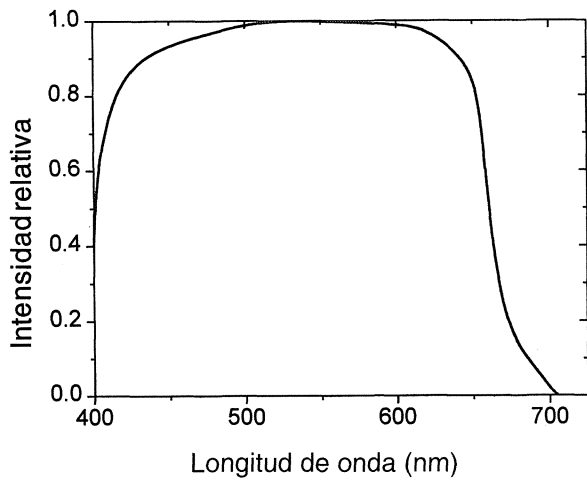


Figura 5. Curva típica de la sensibilidad de una cámara CCD con filtro IV.

Figure 5. Typical curve of the sensibility of a CCD camera with filter IV.

más intenso para las adiciones de nitrógeno y menos para las de hidrógeno. En el caso de este gas se observa, no obstante, la formación de un punto anódico en la raíz del arco junto al bloque de cobre. En este caso se pudo observar una erosión localizada en el ánodo de cobre.

Las diferentes imágenes fueron procesadas en un programa de análisis de imagen para la determinación del radio catódico del arco (definido como el radio máximo del arco localizado próximo al ánodo) y de la zona de su proyección. Para la

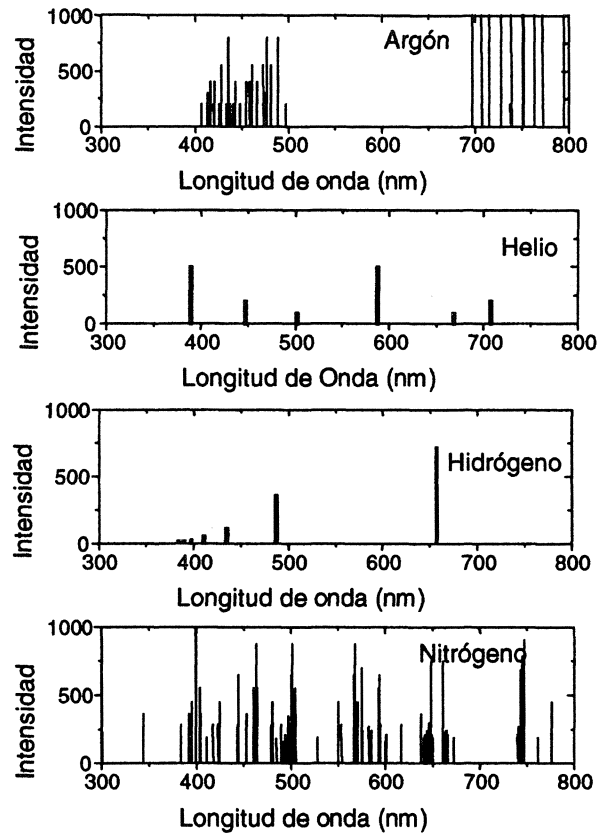


Figura 6. Espectros esquemáticos de emisión, en la región de luz visible, de los gases estudiados.

Figure 6. Schematic emission spectres, within the visible light, of the studied gases.

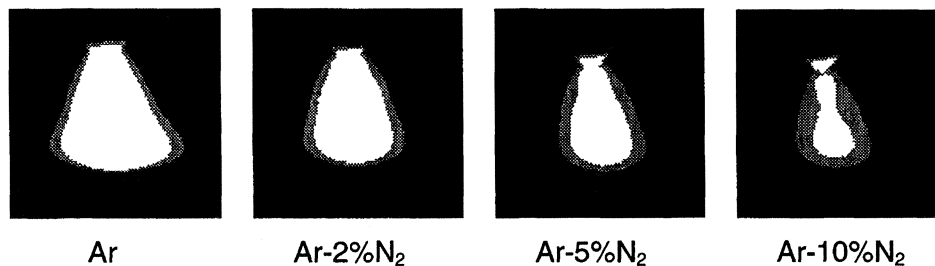


Figura 7. Cambios de forma del arco en función del contenido de nitrógeno en el gas de protección.

Figure 7. Changes of the arc shape in relation to the nitrogen content of the shielding gases.

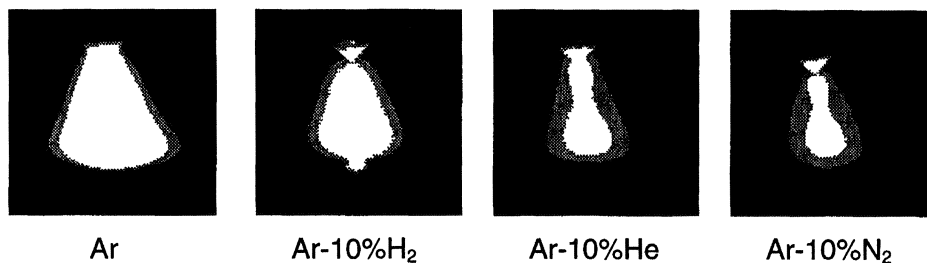


Figura 8. Cambios de forma del arco en función del tipo de adición al gas de protección.

Figure 8. Changes of the arc shape in relation to the kind of addition to the shielding gases.

determinación de esta zona se midió, de forma arbitraria, la superficie de cada imagen comprendida por todos los *pixels* de valores entre 125 y 255. En función del elevado contraste de las imágenes, pequeñas variaciones en el valor inferior de este límite, no afectaban apreciablemente al resultado. La figura 9 muestra los cambios determinados en estos parámetros (diámetro y superficie del arco) en función del contenido de gases añadidos. Se observa, para ambos parámetros, una reducción aproximada lineal en las dimensiones del arco para la adición del helio, en tanto que para los otros gases esta variación no fue lineal. Para los restantes gases, las dimensiones del arco aparentemente tienden a estabilizarse para una cantidad suficientemente alta de gas añadido (Fig. 9).

Puede intentarse relacionar estas variaciones de tensión, luminosidad, superficie y diámetro del arco, con las propiedades físicas de los gases utilizados (Tabla II). El potencial de ionización no puede relacionarse directamente con la tensión de la operación. De hecho, la tensión de operación tiende a aumentar con el contenido de gas en la mezcla de un modo inverso al potencial de ionización, o sea, cuanto mayor sea el potencial de ionización, más suave es la variación de la tensión de operación con el contenido de gas (Tablas I y II). No obstante, aunque no ha sido cuantificado, se ha observado que la dificultad en la apertura del arco parece estar influida por el potencial de ionización como aparece aceptado en la bibliografía.

En condiciones estacionarias, el calor generado en la columna del arco (considerando solamente el calor de origen eléctrico) es igual al calor perdido por diferentes mecanismos (2), es decir:

Tabla II. Propiedades físicas de algunos gases utilizados en soldadura
Table II. Physical properties of some welding gases

Propiedad	Gas				
	Argón	Helio	Hidrógeno	Nitrógeno	
Potencial de ionización					
a 21 °C (I)	(V)	15,75	24,58	13,60	14,54
(II)	(V)	27,62	54,40	-	29,61
Densidad a 21 °C	(kg/m ³)	1,67	0,17	0,084	1,17
Conductividad térmica a 21 °C	k (mW/cm °C)	162	1.484	1.682	241
Calor específico a 21 °C	(kJ/kg °C)	0,52	5,19	14,26	1,04
	(kJ/m ³ °C)	0,868	0,882	1,198	1,217
Energía de disociación	(kJ/mol)	-	-	430,0	940,0
Temperatura de disociación (*)	(K)	-	-	4.580	8.300

(*) 90 % de disociación^[5].

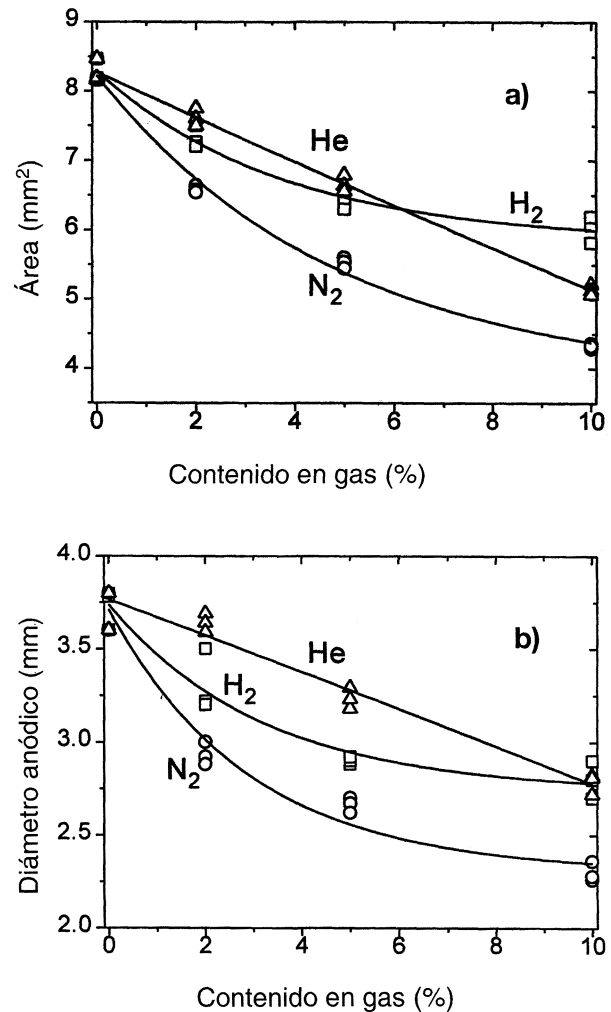


Figura 9. Variación de (a) la zona del arco y (b) del diámetro anódico en función del contenido de gas mezclado con argón.

Figure 9. Variation of zone arc (a) and anodic diameter (b) in relation to gas additions to argon.

$$E^2 \sigma = C(T) + R(T) + H(T) \quad (1)$$

donde E es el campo eléctrico en la columna, σ es su conductividad eléctrica, T es la temperatura y $C(T)$, $R(T)$ y $H(T)$ son, respectivamente, las pérdidas por conducción, radiación y convección.

Para un arco cilíndrico, el término $C(T)$ viene dado por:

$$C(T) = -\frac{1}{r} \frac{d}{dr} \left(\kappa r \frac{dT}{dr} \right) \quad (2)$$

donde κ es la conductividad térmica del plasma en la columna y r es la distancia en relación al eje central del arco.

Todos los términos de las ecuaciones (1) y (2) dependen, de forma más o menos compleja, de la temperatura y de la composición del arco, y en el caso de la convección, de las condiciones del flujo del plasma en la columna del arco. Así, la solución analítica de esta ecuación es básicamente imposible, existiendo algunas soluciones numéricas parciales^[6]. Una evaluación cuantitativa de esta ecuación es, sin embargo, posible y capaz de ayudar al entendimiento del efecto de la composición del gas de protección en las características del arco.

Para una longitud del arco dada (I_a) y nivel de intensidad de corriente, la tensión del arco viene dada por:

$$V = V_A + V_C + E \cdot I_a \quad (3)$$

donde V_A y V_C son respectivamente, las tensiones en las regiones de caída anódica y catódica. Suponiendo que V_A y V_C resulten afectadas de forma importante por la composición del gas de protección (lo que puede no ser cierto^[7]), la tensión del arco se verá afectada solamente por los cambios en E , lo que sería determinado por el balance de energía dado por la ecuación (1) que tendría la forma general siguiente:

$$E = \sqrt{\frac{C(T) + R(T) + H(T)}{\sigma}} \quad (4)$$

donde $C(T)$ representa las pérdidas por conducción térmica.

La radiación emitida por el arco está constituida por dos componentes: la radiación característica, dependiente en gran medida de la composición del gas (Fig. 6), y la radiación continua, que tiene una gran dependencia de la temperatura. Richardson^[8], a través de un cálculo simplificado, estima

pérdidas por radiación en la columna del arco TIG de casi el 10 % (3 % de la energía total del arco).

Las pérdidas por convección estarían asociadas con la absorción del gas frío en el chorro de plasma y su calentamiento en el arco, estando así relacionadas con el valor del calor específico del gas (o de su variación de entalpía). Además, según Richardson^[8], las pérdidas por convección pueden alcanzar cerca del 30-40 % de la potencia generada en la columna.

Las pérdidas por conducción serían responsables por la restante pérdida de energía en el arco, esto es, cerca del 50-60 %, y dependerían en gran medida del valor de la conductividad térmica del gas.

De esta manera, el campo eléctrico y, por tanto, la tensión del arco, tenderían a aumentar para gases de mayor conductividad térmica, mayor calor específico y menor conductividad eléctrica.

Los valores de las propiedades mostradas en la tabla II se refieren, en general, a la temperatura ambiente, no siendo por tanto las mismas condiciones encontradas en el arco TIG (temperatura del orden de 10^4 K). Datos de diversas fuentes^[2 y 9-11] sugieren que, a altas temperaturas, la conductividad térmica varía, de forma creciente, en el siguiente orden: argón, nitrógeno, helio, hidrógeno (para la misma temperatura ambiente) y la entalpía de calentamiento: argón, helio, hidrógeno, nitrógeno (también para la temperatura ambiente), siendo los valores relativos a los gases biatómicos (nitrógeno e hidrógeno) muy superiores al de los gases nobles.

Las conductividades eléctricas del argón y del nitrógeno son muy similares (si bien fuertemente dependientes de la temperatura), entre 10.000 y 20.000 K. Por otro lado, el helio tiende a presentar una conductividad eléctrica casi diez veces menor que el argón en la misma franja de temperatura (2). Esta diferencia se hace mucho menor, casi la mitad, cuando se consideran mezclas Ar-He hasta un 79 % He. Por tanto, mezclas Ar-He con bajo contenido de helio tienden, en cuanto se refiere a la conductividad eléctrica, a tener un comportamiento muy parecido con el del argón puro.

Si se considera la importancia relativa de los diferentes mecanismos de pérdida del calor por la columna del arco discutida en los párrafos anteriores (10 % por radiación, 30 % por convección y 60 % por conducción), las diferencias en las propiedades de los gases estudiados en relación con el argón (conductividad térmica del hidrógeno 10 veces mayor, la del helio 8 veces mayor y la del nitrógeno 1,5 veces mayor; calor específico

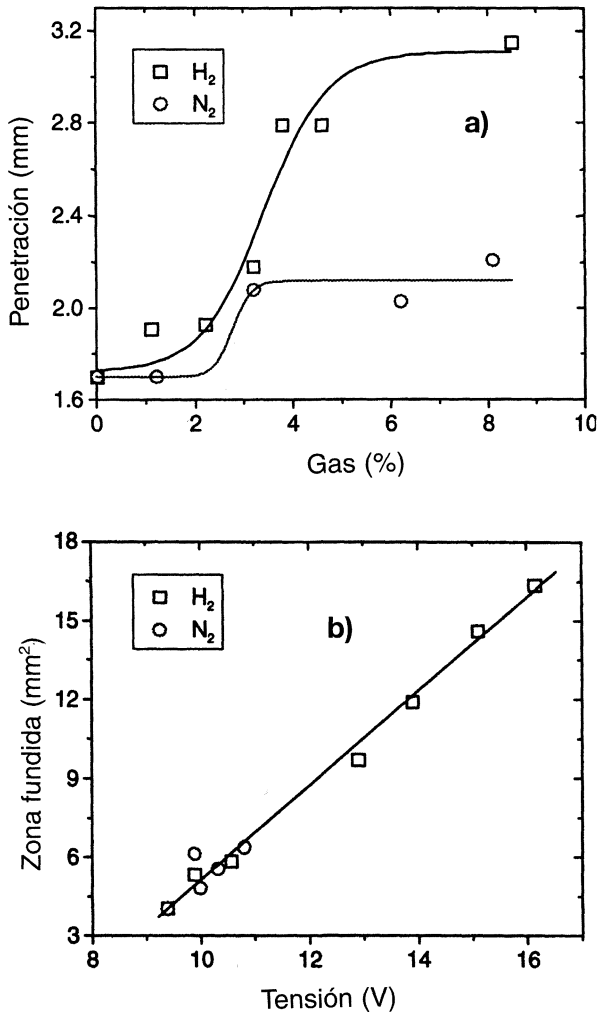


Figura 10. Variación de la penetración en soldaduras de acero inoxidable austenítico en función de (a) cantidad de gas en la mezcla con argón y (b) tensión media del arco^[4].

Figure 10. Penetration variation in austenitic stainless steel in relation to (a) the content of gas in the argon mixture and (b) the mean arc voltage^[4].

volumétrico del hidrógeno y del nitrógeno cerca de 1,4 veces mayor que el del argón y del helio y conductividad eléctrica del helio cerca del doble de los otros gases), puede hacerse una estimación utilizando la ecuación (3). Aplicando los factores citados para cada gas, se encuentra que el campo eléctrico E sería proporcional a los siguientes factores: 2,55 para el hidrógeno, 1,199 para el nitrógeno y 1,82 para el helio. Los valores encontrados para la inclinación de las curvas tensión de operación del arco con el contenido de gas en la mezcla con el argón fueron, respectivamente, 0,6, 0,3 y 0,7 para el hidrógeno, nitrógeno y helio.

Puede observarse que tanto los factores calculados del modo descrito en el párrafo anterior como la inclinación de las curvas para el hidrógeno y nitrógeno presentan la misma relación (esto es,

los valores relativos al hidrógeno son dos veces mayores que los referidos al nitrógeno). El helio presentó un factor intermedio y una inclinación de la curva de tensión mucho más baja frente al contenido. Hay que señalar, no obstante, que la energía de disociación no fue considerada en los cálculos y podría explicar la diferencia en el efecto del helio. Exactamente, este gas no está influido por la energía de disociación (que sería importante en la entalpía de calentamiento y, por tanto, en las pérdidas de calor). Otro punto importante es que el potencial de ionización del helio es superior al de los otros gases y, por ello, sólo tendría un papel importante en la ionización del arco cuando está presente en contenidos elevados, lo que concuerda con la afirmación de que la conductividad eléctrica de mezclas argón-helio sólo aumenta considerablemente para contenidos de helio superiores al 70 %.

Además de su efecto en el arco, la introducción de un segundo gas (N₂, H₂ o He) al gas de protección afecta la forma del cordón de soldadura obtenido, causando en general, un aumento de la penetración. La figura 10a muestra que, en este sentido, el hidrógeno es más eficaz que el nitrógeno. Sin embargo, cuando la zona de la sección transversal se considera en relación con la tensión del arco, se observa que el aumento de la penetración es independiente del tipo de gas (Fig. 10b). Así, para una longitud de arco e intensidad semejantes, el aumento de la capacidad de fusión del proceso asociado con la adición de N₂ o H₂ al gas de protección parece estar asociado directamente con el aumento de la energía generada en el arco. Un efecto similar debe esperarse para las adiciones de helio.

4. CONCLUSIONES

La tensión de la operación de arcos de soldadura TIG varía con la composición de la atmósfera usada en la protección gaseosa, aumentando cuando se añade N₂, H₂ o He al argón. Esta variación puede ser o no ser lineal, dependiendo de los gases y las proporciones de la mezcla y de las condiciones operacionales. Una reducción de la anchura y la luminosidad de arco se observa con el aumento del contenido de cualquiera de los gases utilizados cuando se añaden al argón. Se observan también cambios más pronunciados en la forma del arco con la adición de nitrógeno. Adiciones de hidrógeno al argón por encima de un determinado contenido (en torno del 10 %, en este trabajo) causan

la formación del punto anódico. Fue previsto, a través de un modelo teórico, que la tensión del arco tiende a aumentar para los gases de mayor conductividad eléctrica lo que concuerda con los resultados experimentales obtenidos.

REFERENCIAS

- [1] C.E. JACKSON, *Weld. J.* 39 (3-5) (1960) 129s-140s, 177-190s, 225s-230s.
- [2] J.F. LANCASTER, *The physics of welding*. Oxford: Pergamon Press, 1986, pp. 120-190.
- [3] P.J. MODENESI, *Introdução à física do arco elétrico e suas aplicação na soldagem*. Belo Horizonte: EMT/UFMG, 1995, pp. 2-94.
- [4] L.C. DE OLIVEIRA, *Soldabilidade de Aços Inoxidáveis Austeníticos com Gases Especiais*, Relatório de Iniciação Científica, EMT/UFMG, 1996, pp. 22-24.
- [5] D.R. MILNER *et al.*, *Br. Weld. J.* (Feb) (1960) 73-88.
- [6] P. KOVITYA y J.J. LOWKE, *J. Phys. D.* 18 (1985) 53-70.
- [7] P.J. MODENESI y J. NIXON, *Weld. J.* 73 (1994) 219s-224s.
- [8] I.M. RICHARDSON. *Introduction to Arc Physics*, Cranfield, School of Industrial Science-Cranfield Institute of Technology 1989.
- [9] K. AHLBERG. *AGA Gas Hadbook*, Lidingö, Suecia, AGA, 1985, pp. 159-185.
- [10] American Welding Society, *Welding Handbook*, vol. 1. 8ª ed. Miami, CA, EE.UU, AWS, 1987.
- [11] J.L.R. CARVALHO *et al.* *Dados Termodinâmicos para Metalurgistas*, EMT/UFMG, 1977, pp. 99-188.