

Influencia de la transferencia por arco sobre la microestructura de uniones soldadas usando arco pulsado

Influence of the transfer by arc on the microstructure of welded joint produced by pulsed arc

Sandra Patricia Romero-Nieto^I, Jhon Jairo Olaya-Flórez^{II}

I. Escuela Colombiana de Carreras Industriales. Facultad de Ingeniería. Colombia

Correo electrónico: spromeron@unal.edu.co

II. Universidad Nacional de Colombia. Departamento de Ingeniería Mecánica. Colombia

Recibido: 27 de abril de 2012

Aceptado: 7 de agosto de 2012.

Resumen

Este artículo estudia la influencia de la transferencia de arco pulsado en el proceso de soldadura por arco eléctrico con gas de protección (GMAW, Gas Metal Arc Welding), sobre la microestructura, utilizando dos composiciones de gas de protección y los modos de transferencia de arco pulsado y corto circuito. Se caracterizó la microestructura y las propiedades mecánicas y los resultados indican que se logra una mayor resistencia a la tensión y un perfil de dureza más homogéneo utilizando el modo de transferencia de arco pulsado, debido a que con esta existe una distribución más uniforme del tamaño de grano en las tres zonas de soldadura. La presencia de ferrita acicular fue una constante en todos los tratamientos evaluados, mientras la ferrita *widmastatten* se presentó con preferencia en la transferencia de arco pulsado.

Palabras claves: transferencia en arco pulsado, proceso GMAW, mezclas de gases de protección.

Abstract

This article studies the influence of pulsed arc transfer in the GMAW process on the microstructure, using two shielding gas composition and the pulsed arc and short circuit transfer. The microstructure and mechanical properties was characterized and the results show that is achieved a greater tensile strength and more homogeneous in the hardness profile using the pulsed arc transfer, because it creates a more uniform size grain in the three areas of welding. The presence of a circular ferrite was constant in all treatments tested, while *widmastatten* ferrite was presented preferably in the pulsed arc transfer.

Key words: transfer in pulsed current, GMAW process, shielding gas mixtures.

Introducción

El proceso de soldadura por arco eléctrico con electrodo metálico y gas de protección (GMAW, Gas Metal Arc Welding) se realiza utilizando como metal de aporte un alambre sólido o un alambre compuesto de núcleo metálico, su diferencia radica en que este último se compone de dos secciones: Un núcleo compuesto de elementos aleantes pulverizados y una envoltura metálica. A mediados de la década de los sesenta se presentó la técnica GMAW con transferencia en arco pulsado que mejora los inconvenientes de metal fundido con alta tensión superficial y limitada a posición plana y horizontal del sistema de transferencia globular. El modo de transferencia pulsado se caracteriza por una pulsación de la corriente entre una base y una pico con una frecuencia deseada [1], de tal manera que el valor de la corriente media, está siempre por debajo del umbral de la transferencia en spray de esta forma se logra buena penetración y un metal fundido más fluido y ancho [2].

El propósito de la corriente base es mantener el arco estable, mientras la corriente pico forma y desprende las gotas fundidas, dando buena penetración al cordón de soldadura [3, 2]. Esto permite que la energía del arco se utilice eficientemente, limitando las pérdidas de calor por conducción en el material base que ocurre utilizando la corriente constante, o la transferencia en corto circuito [3]. El hecho de que con la transferencia en arco pulsado, la energía calorífica necesaria para fundir el material base se suministre sólo durante pulsos de corriente pico a intervalos breves de tiempo, favorece que el calor se disipe, logrando una zona afectada por el calor más estrecha [4, 5].

Para lograr la transferencia en arco pulsado es necesario soldar con un equipo semiautomático, y se debe operar con mezclas de gas de protección ricas en argón; ya que este, aporta la transferencia en spray [4]. En este trabajo este gas está acompañado con CO₂, que disminuye la región de transferencia en spray en la columna de arco [6].

Con la técnica GMAW se han desarrollado investigaciones sobre la soldabilidad de aceros como HSL [9], aleaciones de aluminio-titanio [8] y aleaciones de aluminio-zinc-magnesio [4], en donde se encuentra información valiosa sobre el efecto de la microestructura en las propiedades de las uniones soldadas. Por ejemplo, el contenido de inclusiones y los microconstituyentes de la zona de soldadura son factores a controlar, por que determinan el desempeño mecánico de la unión soldada. *Meng* y sus colaboradores [7] en sus investigaciones afirman que las micro grietas asociadas con inclusiones en el metal soldado pueden causar fractura dúctil prematura. *Brownleey* sus colaboradores [8] afirman que la formación de ferrita acicular (AF) mejora la dureza del cordón de soldadura, la cual esta asocia con una alta densidad de inclusiones dentro de un rango de tamaño crítico de aproximadamente 0,5 micras, sin embargo, un excesivo número de inclusiones da lugar a una población de inclusiones de diámetro más pequeño que el diámetro del *Zener*, el cual restringe el crecimiento de grano de la austenita previa y a su vez promueve la formación de ferrita en el borde de grano. *S. Mukhopadhyay* [9], afirma que las grietas se propagan más fácilmente en donde hay ferrita en borde de grano que en donde hay ferrita acicular y que esta última tiene un efecto beneficioso sobre la resistencia en ausencia de otras zonas frágiles, también concluyo que la proporción de la ferrita acicular, aumenta progresivamente con el contenido de oxígeno en el gas de protección y las proporciones de ferrita de borde de grano disminuyen.

El objetivo de esta investigación es determinar la influencia de la transferencia de arco pulsado en el proceso GMAW con alambre compuesto de núcleo metálico, sobre la microestructura de uniones soldadas de acero ASTM A131 grado AH 32 utilizando dos composiciones de gas de protección y los modos de transferencia de arco pulsado y corto circuito.

Materiales y métodos

Se realizó un procedimiento experimental que se divide en las siguientes tres etapas: Obtención de las uniones soldadas, caracterización de las mismas y cálculo de la entrada de calor.

1. Obtención de las uniones soldadas: se fabricaron cuatro uniones soldadas a tope con las características de transferencia y gas de protección mostradas en la tabla 1 y lo establecido por *Germanischer Lloyd*, utilizando como metal base acero ASTM A131 grado AH 32 y metal de aporte alambre compuesto con núcleo metálico E 70 C-6M-H16, de 1.2 mm de diámetro. Los factores y niveles del experimento para obtener las cuatro uniones soldadas se muestran en la tabla 1. Las uniones soldadas utilizadas para este estudio, fueron seleccionadas de tal manera que cumplieran los criterios de aceptación de ISO 5017 en cuanto a defectos superficiales, los cuales se evaluaron mediante ensayos no destructivos de inspección visual y tintas penetrantes, de acuerdo a ISO 3059, con el tipo 2 "penetrante de contraste de color", método C solvente líquido, revelador no acuoso.

Tabla 1. Diseño de experimentos

Factores	Niveles
Transferencia de metal fundido	Arco pulsado
	Corto circuito
Composición de la mezcla de gas de protección	75% Ar y 25 % CO ₂
	92% Ar y 8 % CO ₂

Las mezclas de gases de protección mostradas en la tabla 1, cuya composición corresponde a: 92 % Ar 8 % CO₂ y 75 % Ar 25 % CO₂, se eligieron porque el 75 % de Ar es el mínimo porcentaje de este gas que se debe utilizar en la mezcla; de acuerdo a la especificación del alambre que corresponde a AWS 5.18 y la segunda mezcla con el porcentaje de 92 % de Argón se utilizó para garantizar una mejor transferencia en spray presente en la transferencia de arco pulsado.

La tabla 2 presenta un resumen de los parámetros más importantes que se emplearon en la fabricación de las uniones soldadas a tope.

Tabla 2. Parámetros de soldadura de las uniones soldadas a tope.

Mezcla de gas	Modo de transferencia	Corriente (A)	Voltaje (V)	Flujo de gas (L/min)	% C	Velocidad de avance (mm/min)	Tiempo (segundos)
92Ar-8CO ₂	Arco pulsado	220,5	24,3	15,0	0.059	10,62	226,0
92Ar-8CO ₂	Corto circuito	224,0	17,6	15,0	0.055	10,00	240,1
75Ar-25 CO ₂	Arco pulsado	184,0	23,5	17,5	0.074	11,59	207,0
75Ar-25 CO ₂	Corto circuito	238,5	22,2	15,0	0.059	8,99	267,0

2. Caracterización: se evaluó el comportamiento mecánico en las uniones soldadas mediante el ensayo de tensión con una máquina universal de ensayos *Shimadzu* UEH 50 A, una velocidad de carga de 5 mm/min y utilizando dos probetas para cada unión soldada. Se realizaron mediciones complementarias de microdureza con el durómetro *GNEHM HORGE*B utilizando el indentador *Vickers*, con una carga de 10 kilogramos, sobre la sección transversal de las uniones soldadas, en sus tres zonas; soldadura, zona afectada por el calor y metal base. La microestructura se caracterizó mediante microscopía óptica utilizando el microscopio óptico LECO 500, en la sección transversal de las tres regiones de la unión soldada. El ataque químico de las probetas se realizó sumergiéndolas en nital al 2 % con un tiempo entre 24 a 30 segundos. El análisis de inclusiones se realizó utilizando la sección longitudinal de la región de soldadura y la composición química se caracterizó por medio de espectrometría de chispa.

3. Cálculo de la entrada de calor: la entrada de calor en la unión soldada es una variable que está relacionada con la transferencia del metal fundido y que a su vez determina la microestructura a obtener [10]. En este trabajo la entrada de calor se determinó realizando un balance de térmico, tomando un elemento diferencial como el mostrado en la figura 1 (a y b). Se registró las distancias y la temperatura correspondientes a los ejes x, y, z; y el tiempo de soldadura en cada uno de los pases. La temperatura inicial de soldadura, es decir la de fusión se determinó con base en resultados graficados de la distribución de la temperatura después de un tiempo específico en un calentamiento de placas de acero enfriado uniformemente sobre una superficie en función de la intensidad térmica aplicada [11], la cual relaciona la potencia de soldadura con la temperatura de fusión y la distancia en placas de acero.

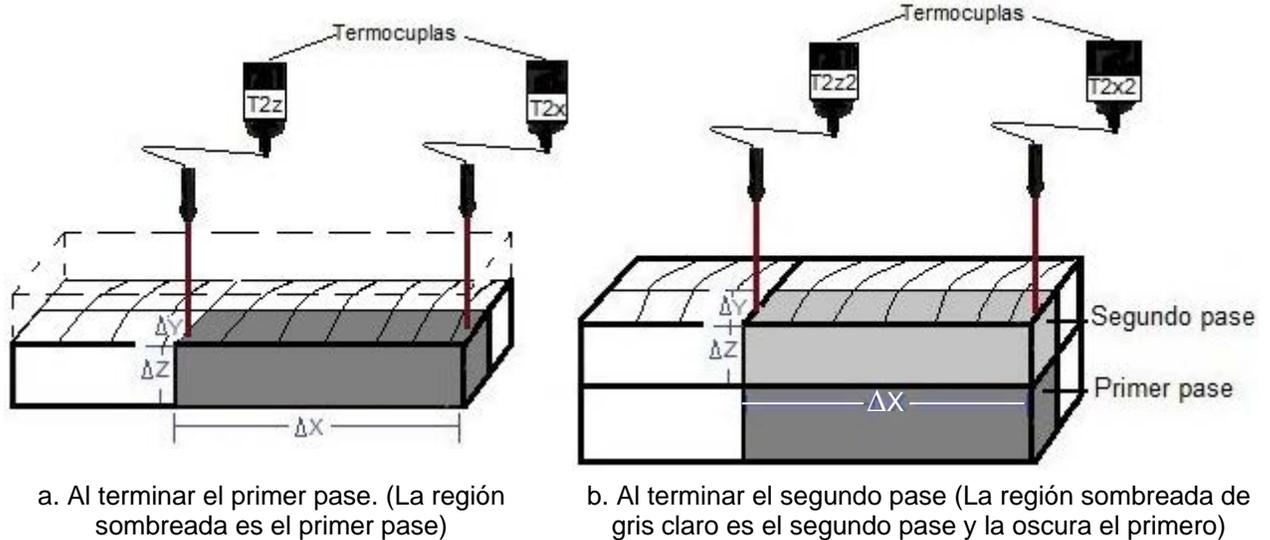


Fig. 1. Elemento diferencial (la región sombreada es el elemento diferencial)

Ahora bien, se registraron datos experimentales de los cambios de temperatura en el tiempo de soldadura a determinadas distancias; y de esta manera las diferenciales se expresan como cambios, de acuerdo a la ecuación 1 [10]:

$$\dot{Q}_{entra}(x) = -\rho A \Delta x C_p \frac{T_{2x2} - T_{1x1}}{\Delta t} - KA_1 \frac{T_{2x} - T_{1x1}}{\Delta x} - KA_2 \frac{T_{2y} - T_{1y1}}{\Delta y} - KA_3 \frac{T_{2z} - T_{1z1}}{\Delta z} + hA_1(T_{2x2} - T_{\infty}) + hA_3(T_{2x2} - T_{\infty}) \quad (1)$$

Dónde $\Delta x, \Delta y, \Delta z$ representa el cambio de longitud en x, y, z del elemento diferencial, Δt es el cambio del tiempo desde el tiempo cero hasta el tiempo de soldadura, las temperaturas T_{1x1}, T_{1y1} y T_{1z1} ; son las correspondientes a la fusión (Temperatura inicial de soldadura en cada pase), las temperaturas $T_{2x}, T_{2z}, T_{2x2}, T_{2x2}$; son tomadas por la termocupla en cada dirección al transcurrir el tiempo de soldadura, como se muestra en la figura 1 (a y b), T_{∞} es la temperatura ambiente (298 °K). Los valores de C_p, K, ρ se tomaron de un estudio sobre la determinación de esfuerzos residuales en la soldadura GMAW de planchas de 6 mm de espesor de acero [12].

En el balance de calor se tuvieron en cuenta las siguientes consideraciones:

$T_{1x1} = T_{1y1} = T_{1z1}$. Que son las temperaturas de fusión (Temperatura inicial de soldadura en cada pase).

$\Delta T_y = T_{2y} - T_{1y1} = 0$. En los dos pases; porque la distancia en esta dirección es muy pequeña (1.7 mm)

Resultados y Discusión

Zona afectada por el calor y entrada de calor

En la tabla 3 se muestran los valores calculados del área de la zona afectada por el calor (ZAC) y entrada de calor obtenidos en las uniones soldadas con los modos de transferencia de corto circuito y arco pulsado. Las uniones soldadas fabricadas con el modo de transferencia de arco pulsado presentan los menores valores de entrada de calor y área de la zona afectada térmicamente. Esto puede ser atribuido al calor por conducción que se disipa durante periodos cortos de tiempo en el modo de transferencia de arco pulsado [4].

Tabla 3. Resultados de caracterización de las uniones soldadas

Transferencia del metal soldado	Mezcla de gas %Ar / %CO ₂	Esfuerzo de fluencia (ksi)	Esfuerzo máximo (ksi)	Área de ZAC (mm ²)	Entrada total de calor KJ/cm	Tamaño de grano primer pase (ASTM)	Tamaño de grano segundo pase (ASTM)
Arco pulsado	92/8	62,79	72,95	16,88	33,02	8	3
	75/25	63,31	73,82	18,06	34,13	8	3
Corto circuito	92/8	61,31	71,25	19,45	34,89	6	1
	75/25	62,90	71,84	20,31	38,07	6	2

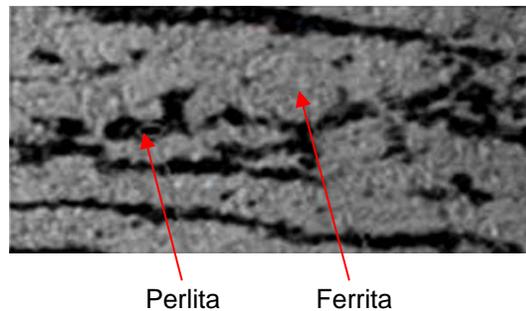
Resistencia a la tensión

La tabla 3 presenta los resultados de resistencia a la tensión de las uniones soldadas y en esta se pueden observar que los más altos valores de resistencia son presentados por las uniones soldadas con el modo de transferencia de arco pulsado y en especial, empleando la mezcla de gas de protección 75 % Ar 25 % CO₂, lo cual puede ser atribuido a una mayor área de grano fino [13] en la región del primer pase de las uniones soldadas. El grano fino se logró por combinación de los siguientes factores: (1) una velocidad de enfriamiento controlada por una disminución de la temperatura durante el tiempo que permanece la corriente base y (2) una mayor temperatura de fusión durante la fase de corriente pico (transferencia en spray) que se favorece por el mayor contenido de CO₂.

En la tabla 3 se observa que el mayor tamaño de grano en los dos pases de soldadura y la menor resistencia a la tensión se presentó en las uniones soldadas con el modo de transferencia en corto circuito y la mezcla de gas 92 % Ar, 8 % CO₂. Esto puede ser explicado por una mayor velocidad de enfriamiento que desarrolla mayores tensiones residuales por un calentamiento localizado, enfriamiento no uniforme y un fuerte gradiente térmico en la zona de soldadura [14].

Caracterización microestructural del metal base

La figura 2 muestra la microestructura del metal base el Acero ASTM A 131 grado AH 32. Se observa la presencia de microconstituyentes típicos de acero de bajo carbono, es decir una matriz ferrítica con granos alargados de perlita. De acuerdo a la regla de la palanca y utilizando 0.18 % de C [15], se obtuvo que los microconstituyentes en el metal base se encuentran en la siguiente proporción: Ferrita es 75.86 % y Perlita de 24.13 %.

**Fig. 2.** Microestructura del metal base a 500 x

Microestructura de la zona afectada por el calor

La figura 3 presenta las microestructuras de la ZAC. Los resultados de la parte de izquierda corresponden a la región adyacente de la línea de fusión y presenta el grano más grueso debido a que es el que experimenta la más alta temperatura recibida por la transferencia de calor por conducción desde la región de soldadura. En esta región la ferrita y perlita del metal base original se transformaron en austenita de gran tamaño a una temperatura superior a Ac₃ del diagrama hierro-carbono, homogeneizándose la estructura durante el calentamiento y luego en el enfriamiento la austenita se transformó en granos de ferrita y perlita, manteniendo el tamaño de grano de la austenita. La figura 3a muestra la microestructura de las zonas afectadas por el calor de las muestras soldadas con arco pulsado con la mezcla de gas 92 % Ar/8 % CO₂. En general la zona afectada por el calor en el primer pase presenta una microestructura uniforme con un tamaño

de grano fino. Por otro lado, en el segundo pase se observa un aumento del tamaño desde el metal base hasta la línea de fusión. Esto también se observa en la figura 3b, que presenta la microestructura de las uniones soldadas en el modo de transferencia en corto circuito. Nótese que en este último, en los dos pases se aprecia un crecimiento del tamaño de grano en la ZAC, dicho crecimiento es mayor en los granos cercanos a la línea de fusión, siendo más notorio en el primer pase. Esto puede ser atribuido a las diferentes temperaturas que existen a lo largo de la distancia entre la línea de fusión y metal base presentando en todas ellas los micro constituyentes de ferrita y perlita, ya que este acero es de bajo carbono. En la figura 3 también se observa que el crecimiento del grano en la sub zona contigua a la línea de fusión, es menor utilizando el tipo de transferencia de arco pulsado comparado a la microestructura lograda en el modo de corto circuito. El menor crecimiento de grano en el modo pulsado se logra mediante la disminución la temperatura por la disipación del calor entre pulsos.

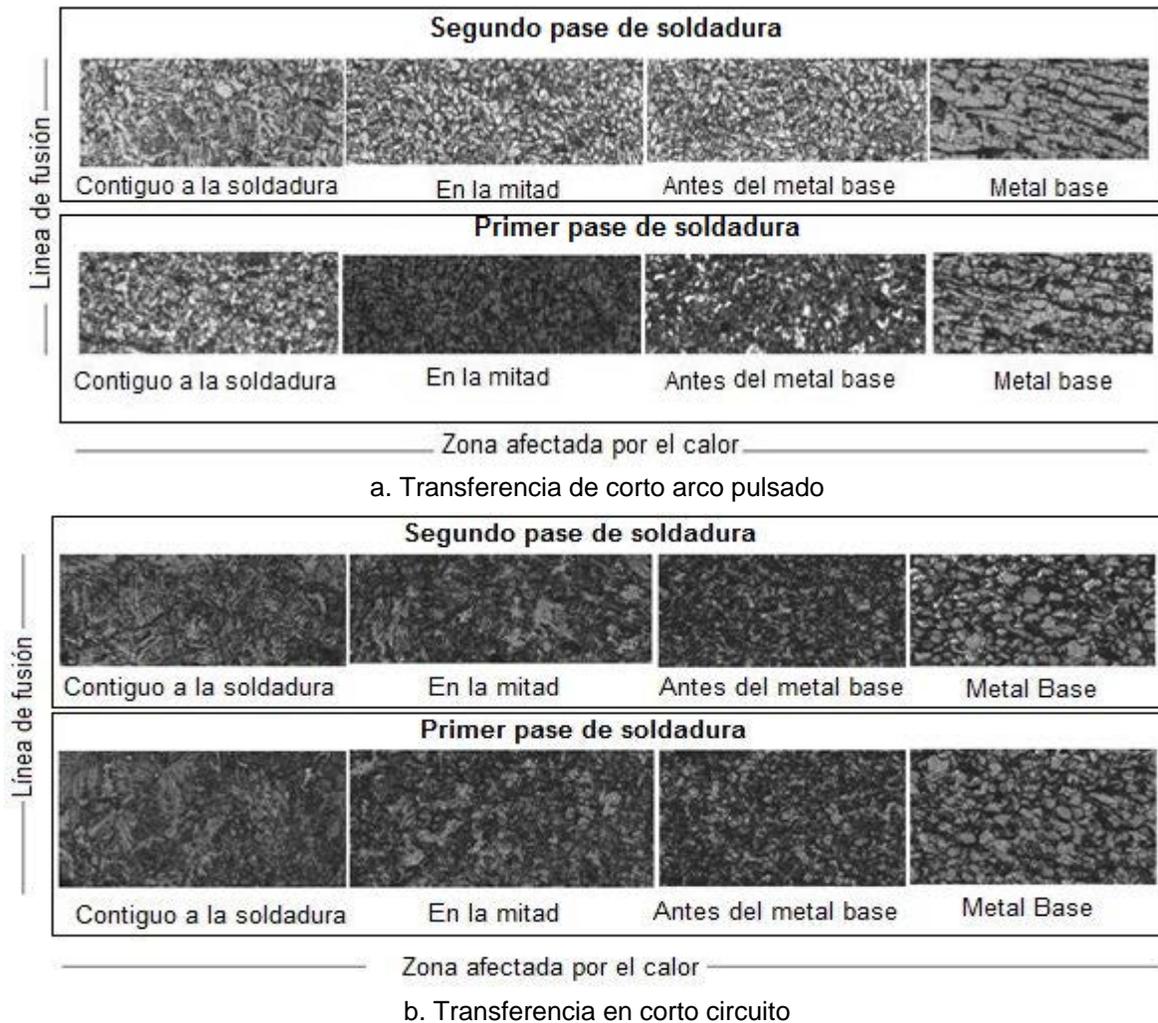


Fig. 3. Microestructura de la ZAC, con la mezcla de gas 92%Ar/8% CO₂ A 200 aumentos

La figura 4 (a-d) muestra los valores de dureza en la zona afectada por el calor. Se puede observar que en todos los tratamientos el valor de la dureza tiene una tendencia a disminuir desde la línea de fusión (ubicada al iniciar la ZAC) donde el grano es más fino hasta la región cercana al metal base, en donde el grano se está transformando mediante un revenido hasta obtener la microestructura original y la dureza muy cercana al metal base.

Los perfiles de dureza de las uniones soldadas con la transferencia en corto circuito (figuras 4 a y 4b) presentan una mayor diferencia en sus valores si se comparan entre pases y entre zonas de soldadura que las uniones soldadas que utilizaron la transferencia en arco pulsado (figuras 4c y 4d); dicha marcada diferencia en los valores de dureza en las uniones soldadas obtenidas con la transferencia en corto circuito,

probablemente creará mayores tensiones internas que las experimentadas con la transferencia en arco pulsado.

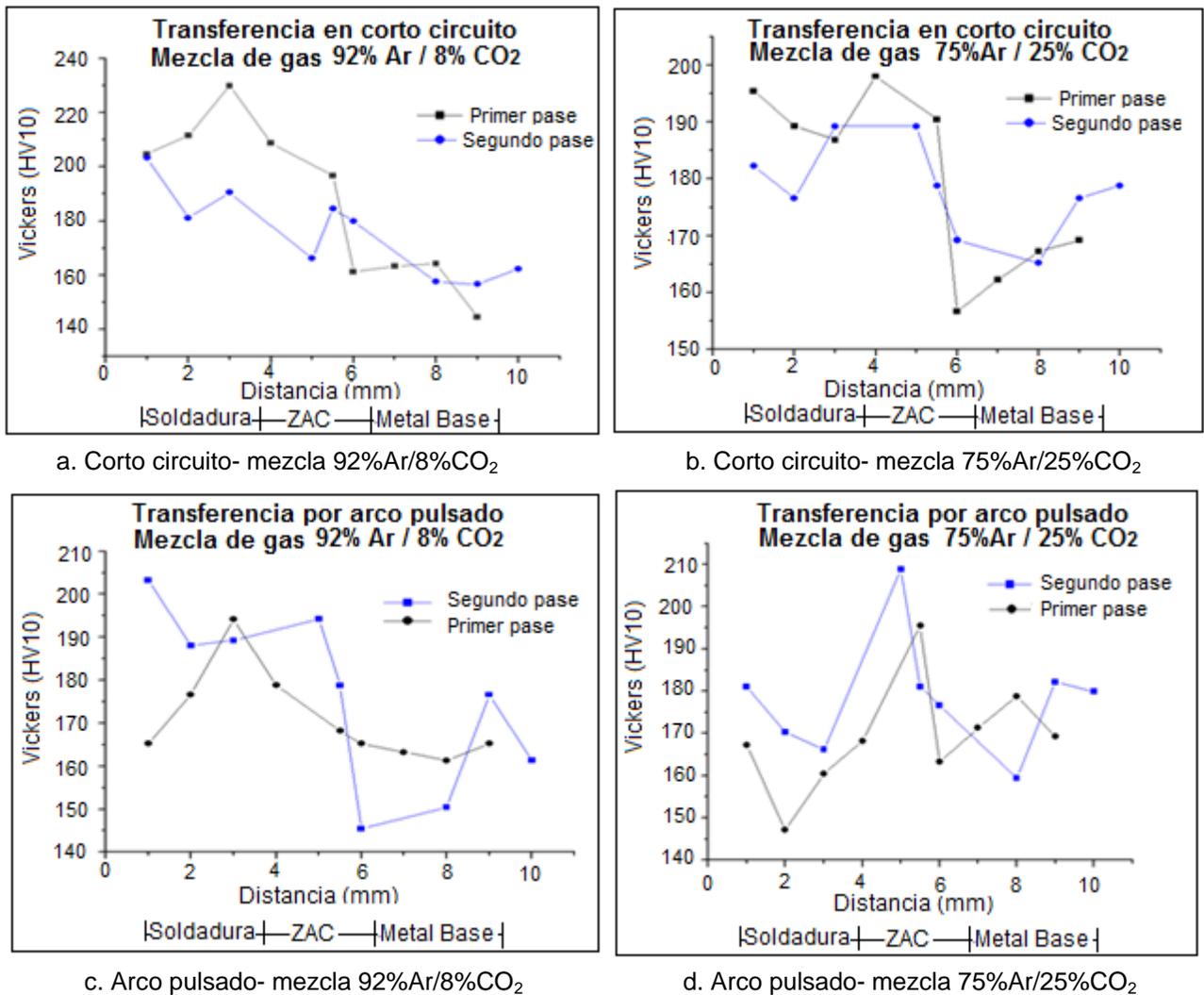
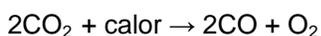


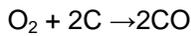
Fig. 4. Perfiles de dureza

Microestructura de la región de soldadura

La microestructura de la unión soldada de aceros depende del contenido de carbono. En este caso, la concentración de carbono en la región de soldadura obtenida por espectrometría de chispa para cada uno de los tratamientos se muestra en la tabla 2. En estos resultados se puede apreciar que el contenido de carbono en la región de soldadura fue mayor cuando se utiliza la mezcla de gas de protección 75 % Ar-25 % CO₂ y el modo de transferencia de arco pulsado que en los otros tratamientos. Esto se debe a la combinación de una mayor concentración de CO₂ y un menor tiempo de soldadura y corriente. El contenido de carbono en el metal depositado por soldadura es una función de la composición del gas de protección, el metal base y el tiempo permitido para la reacción [9]. De acuerdo con *Grong y Christensen* [16] la composición del cordón de soldadura está controlada por las reacciones químicas que ocurren en el baño de fusión a temperaturas elevadas, las cuales suceden en dos etapas: la primera justo por debajo del arco, se disuelve el oxígeno proveniente de los gases de protección en cantidades mayores. En este caso la mezcla de gas de protección se compone de Ar/ CO₂ y la reacción del CO₂ es:



Ahora bien, en la segunda etapa el oxígeno presente en la mezcla de gases de protección reacciona con el carbono del acero, formando una acumulación de monóxido de carbono en la atmósfera circundante, este efecto se intensifica al aumentar la temperatura, de acuerdo a la siguiente reacción [17]:



Microestructura de la transferencia en arco pulsado

La figura 5 muestra la microestructura obtenida en el primer pase de soldadura al utilizar el modo de transferencia de arco pulsado. Se observa una microestructura de perlita y ferrita equiaxial, muy similar al formado en la ZAC. Esto seguramente favoreció un mayor valor de resistencia mecánica, a causa de una transición leve en el valor de la dureza desde la zona de soldadura hasta el metal base en el primer pase de soldadura. Dicha uniformidad en la microestructura posiblemente se debe a que al pulsar la corriente existe un refinamiento de grano en el primer pase de soldadura debido al enfriamiento relativamente lento, que se logra por la disipación del calor por conducción durante los pulsos de corriente.

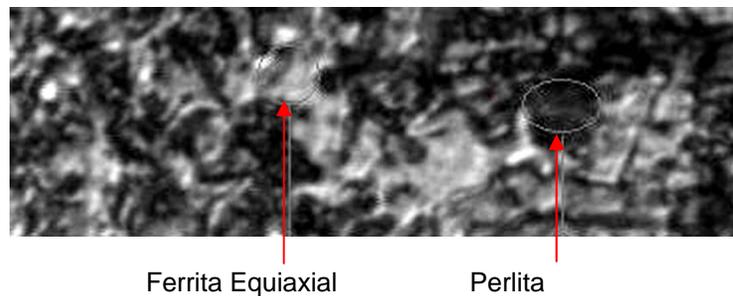


Fig. 5. Primer pase, con transferencia de arco pulsado y la mezcla de gas 75%Ar / 25% CO₂A 2000 x

La figura 6 (a-b) muestra las microestructuras del segundo pase de soldadura de las uniones soldadas obtenidas con el modo de transferencia de arco pulsado. Se puede observar morfologías de ferrita acicular, de borde de grano y widmastatten. Esta microestructura se logra por un aumento en la velocidad de enfriamiento y favorece el aumento de dureza (ver fig. 4 c-d) [18, 8]. Esta microestructura es ligeramente similar al correspondiente al mismo pase con la transferencia de corto circuito, debido a que la velocidad de enfriamiento no se rige por la transferencia de calor proveniente del pase siguiente, sino por el calor liberado por convección hacia el aire.

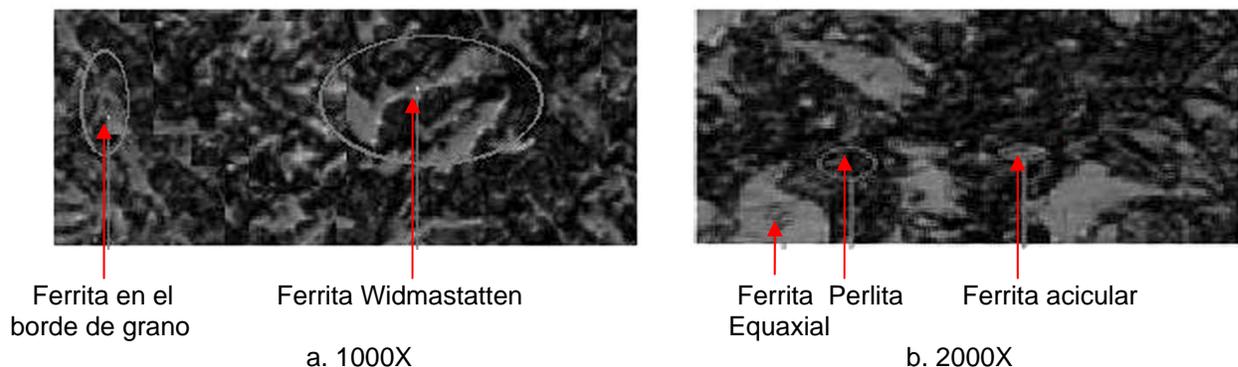


Fig. 6. Segundo pase, con la transferencia de arco pulsado y la mezcla de gas 92%Ar / 8% CO₂.

Microestructura de la transferencia en corto circuito

Las figuras 7 a-b muestran los microconstituyentes de ferrita acicular, ferrita de borde de grano y perlita en uniones soldadas con corto circuito. El contenido de ferrita de borde de grano influye considerablemente en la durabilidad del material. Por ejemplo, *S. Mukhopadhyay* [9], en sus investigaciones afirma que las grietas se

propagan más fácilmente en presencia de ferrita en borde de grano que en presencia de ferrita acicular y que esta última tiene un efecto beneficioso sobre la resistencia en ausencia de otras zonas frágiles. En este artículo se encontró menor presencia de ferrita de borde de grano al utilizar el modo de transferencia de arco pulsado ya que existía también ferrita *widmastatten*. La ferrita acicular fue encontrada en todos los tratamientos.

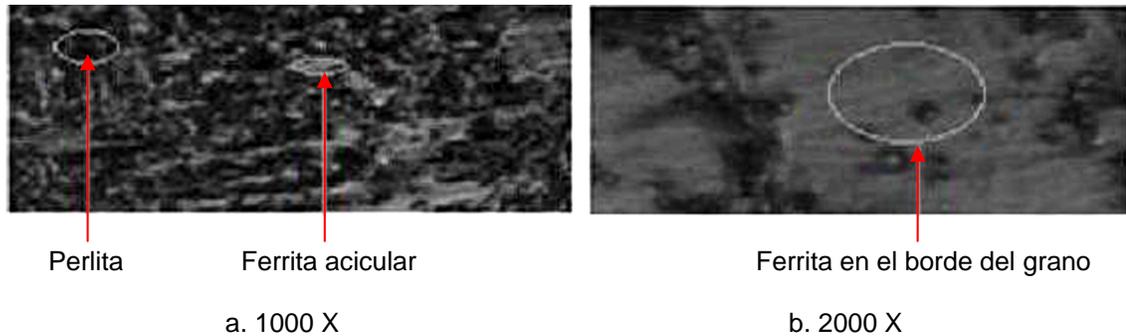


Fig. 7. Segundo pase utilizando la transferencia de corto circuito y las mezclas de gas 92%Ar /8% CO₂

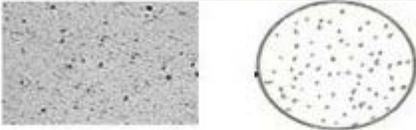
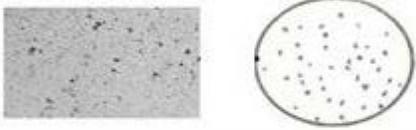
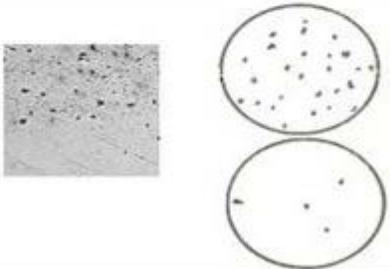
Inclusiones

Las inclusiones en el proceso de soldadura se producen por la interacción del baño de soldadura y el CO₂ y/o O₂ [19]. La presencia de una fracción muy alta en volumen de inclusiones en el metal soldado puede iniciar fractura dúctil prematura [6], por lo tanto, la calidad, la eficiencia y la aceptación general de funcionamiento del proceso GMAW son fuertemente influenciadas por la composición del gas de protección [9].

En la figura 8 se muestran las inclusiones en las uniones soldadas con los modos de transferencia pulsada y en corto. Para una mejor interpretación de los resultados, en la parte inferior de esta figura se presenta las regiones con menor concentración de inclusiones y corresponde a la inter fase entre zona fundida de metal base sin disolverse con el metal de aporte.

Ubicación	Comparación de Inclusiones con el patrón ASTM		Serie	Categoría (cantidad)
Segundo pase de soldadura			Fina Entre 8 y 12 micras	4
Primer pase de soldadura			Fina Entre 8 y 12 micras	4
Interfase Primer pase de soldadura y metal base fundido (ubicado en la raíz de la soldadura)			Gruesa > = 12 micras	5
			Gruesa > = 12 micras	1

a. Transferencia en corto circuito

Ubicación	Comparación de Inclusiones con el patrón ASTM	Serie	Categoría (cantidad)
Segundo pase de soldadura		Gruesa > = 12 micras	5
Primer pase de soldadura		Gruesa > = 12 micras	4
Interfase Primer pase de soldadura y metal base fundido (ubicado en la raíz de la soldadura)		Gruesa > = 12 micras	3
		Gruesa > = 12 micras	1

b. Transferencia en arco pulsado

Fig. 8. Medida de inclusiones. Tratamiento con la mezcla de gas de protección 75%Ar /25% CO₂

Por otra parte en la parte superior de la figura 8 se aumenta el número de inclusiones y corresponde al primero y segundo pase de soldadura. También se puede observar que el número de inclusiones es mayor en las uniones soldadas con transferencia de arco pulsado, lo cual puede estar explicado por su menor tamaño de grano. Estos resultados, están de acuerdo con lo argumentado por G.R. Edwards [20], que encontró que tamaño de grano es inversamente proporcional al contenido de inclusiones debido a la mayor magnitud de las fuerzas de fijación con contenidos de inclusión más altos.

Conclusiones

Se produjeron uniones soldadas a tope del acero ASTM A131 grado AH 32 con el proceso GMAW con transferencia de arco pulsado y en corto circuito y utilizando las mezclas 92 % Ar 8 % CO₂ y 75 % Ar 25 % CO₂. A continuación se presentan los logros más importantes de esta investigación:

Se obtuvo la mejor resistencia a la tensión en las uniones soldadas fabricadas con la mezcla de gas de protección 75%Ar/25%CO₂ y en el modo de transferencia de arco pulsado, debido a obtención de un grano más fino.

En la zona afectada por el calor de todas las uniones soldadas, se presentó una distribución de la dureza, desde un valor máximo, que progresivamente disminuyó, esto se debe a que en la zona inmediatamente adyacente a la línea de fusión existió un aumento en el tamaño de grano, seguido de un refinamiento hasta el lugar donde se encuentra el metal base, producto del calentamiento por conducción, que recibe de la zona de soldadura.

Utilizando el modo de transferencia de arco pulsado se logra un área de la ZAC más pequeña, un tamaño de grano más uniforme y valores de dureza más altos que los presentados en las uniones soldadas con corto circuito.

En la región de soldadura se observó ferrita acicular. La ferrita de morfología *widmastatten* se presentó con preferencia en el modo de transferencia de arco pulsado mientras la ferrita de borde de grano estuvo presente en el tipo de transferencia de corto circuito.

El modo de transferencia pulsado se caracteriza por una pulsación de la corriente entre una base y una pico, de tal manera que el valor de la corriente media, está siempre por debajo del umbral de la transferencia en spray, de esta forma se logra buena penetración y un metal fundido más fluido y ancho [2].

En la transferencia de arco pulsado, se obtiene una menor pérdida de calor por conducción en el material base que la lograda con la transferencia en corto circuito [3].

Agradecimientos

Los autores expresan su agradecimiento por su apoyo técnico y económico a las siguientes entidades: Universidad Nacional de Colombia, Corporación de Ciencia y Tecnología para el Desarrollo de la Industria Naval, Marítima y Fluvial COTECMAR y la empresa SAGER y el SENA. Por su apoyo técnico, a los Ingenieros Edgar Espejo, Alfredo Morales, Jank Vienzenz y Camilo Vargas. Por su aporte en la fabricación de las uniones soldadas a los Profesores Fabio Cueva y Elvis Solano Montaña. Por su apoyo en la realización de los ensayos al Ingeniero Heberto Romero y Andrés Gil Plazas.

Referencias

1. Pal, K., Bhattacharya, S. y Surjya, K. "Investigation on arc sound and metal transfer modes for on-line monitoring in pulsed gas metal arc welding". *Journal of Materials Processing Technology*. 2010, vol. 210, n°. 10, p. 1397-1410. [Consultado el: 6 de Junio de 2011].
Disponible en: <http://www.sinab.unal.edu.co:2053/science/article/pii/S092401361000110X>
ISSN 0924-0136. DOI 10.1016/j.jmatprotec.2010.03.029.
2. Praveen, P., Yarlagadda, D. y Kang. M. "Advancements in pulse gas metal arc welding". *Journal of Materials Processing Technology*. 2005, vol. 164-165, p. 1113-1119. [Consultado el: 6 de Junio de 2011]
Disponible en: <http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0924013605002025> ISSN 0924-0136.
DOI 10.1016/j.jmatprotec.2005.02.100.
3. Balasubramanian, V., Ravisankar, V. y Madhusudhan, G. "Effect of pulsed current welding on fatigue behavior of high strength aluminium alloy joints". *Materials and Design*. 2008, vol. 29, n° 2, p. 492-500. [Consultado el: 6 de Junio de 2011].
Disponible en: <http://www.sinab.unal.edu.co:2053/science/article/pii/S0261306907000052>.
ISSN 0261-3069. DOI 10.1016/j.matdes.2006.12.015.
4. Janaki, R., G. Mitra, T. y Shankar V. "Microstructural refinement through inoculation of Type 7020 Al-Zn-Mg alloy welds and its effect on hot cracking and tensile property". *Journal of Materials Processing Technology*. 2003, vol. 142, n° 1, p 174-181. [Consultado el: 6 de Junio de 2011] Disponible en: <http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0924013603005740>
ISSN 0924-0136. DOI 10.1016/j.jmatprotec.2005.02.100
5. Mousavi, M. y Haeri, M. "Estimation and control of droplet size and frequency in projected spray mode of a gas metal arc welding (GMAW) process". *ISA Transactions*. 2010, vol. 50, n° 3, p. 409-418. [Consultado el: 8 de Diciembre de 2011]. Disponible en: <http://www.sinab.unal.edu.co:2053/science/article/pii/S0019057811000413>. ISSN 0019-0578.
DOI 10.1016/j.isatra.2011.02.004
6. Pires, I., Quintino, L. y Miranda, R. M. "Analysis of the influence of shielding gas mixtures on the gas metal arc welding metal transfer modes and fume formation rate". *Materials and Design*, 2007, vol. 28, n° 5, p. 1623-1631. [Consultado el: 6 de Junio de 2011]. Disponible en: <http://www.sinab.unal.edu.co:2053/science/article/pii/S0261306906000537>. ISSN 0261-3069.
DOI 10.1016/j.matdes.2006.02.012.
7. Bin, M., Meng, L., Kewei, G. et al. "Failure analysis of the oil transport spiral welded pipe". *Engineering Failure Analysis*. 2012. vol. 25, p. 169-174 [Consultado el: 1 de Junio de 2012].
Disponible en: <http://www.sinab.unal.edu.co:2053/science/article/pii/S135063071200091X>.
ISSN 1350-6307
8. Brownlee, J., Matlock, B y Edwards, G. R. "Effect of aluminium and titanium on the microstructure and properties of microalloyed steel weld metal". *Welding Inst*. 1986, vol. 186-196, p. 245-250.
DOI oclc/12442225.
9. Mukhopadhyay, S. y Pal. T. "Effect of shielding gas mixture on gas metal arc welding of HSLA steel using solid and flux-cored wires". *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*. 2005, vol. 29, p. 262-268. [Consultado el: 10 de Febrero de 2011].
Disponible en: <http://www.sinab.unal.edu.co:2090/content/786062686w762232/fulltext.pdf>.
ISSN 1433-3015

10. Ghosha, P., Dorn, L., Hübner, M. *et al.* "Arc characteristics and behavior of metal transfer in pulsed current GMA welding of aluminium alloy". *Journal of Materials Processing Technology*, 2007, vol. 194, n° 1-3, p. 163-175. [Consultado el: 10 de Febrero de 2011].
Disponible en: <http://www.sinab.unal.edu.co:2053/science/article/pii/S0924013607004621>.
ISSN 0924-0136. DOI 10.1016/j.jmatprotec.2007.04.113
11. Leroy, D., Siewert, T., Liu, S. *et al.* ASM Handbook. *Welding, brazing and soldering: Energy Sources Used for Fusion Welding*. 9 th ed. New York: ASM. 2004. vol. 6, 2873 p. 16-22. ISBN 0-87170-377-7
12. Matus, C. "Determinación de esfuerzos residuales en la soldadura GMAW de planchas de 6 mm de espesor de acero ASTM A-131-82-B". Arsenal Naval Talcahuano. 1990. p. 4.
[Consultado el: 10 de Febrero de 2011]. Disponible en: www.fontem.com/documentos/descargar/170.html.
13. ASM. *Metallography and Microstructures: The materials information company*. 9 th ed. New York: ASM. 2004. vol. 9, p.100-104. 2733 p. ISBN 0-87170-706-3
14. Withers, P. y Bhadeshia, H. "Residual stress part 2 nature and origins". *Materials Science and Technology*. 2001, vol.17, p. 366–375. ISSN 0267–0836. *Specification for Structural Steel for Ship*. ASTM A131/A 131M. International. 2011.
15. American Society for the Testing and Material. *Standard Specification for Structural Steel for Ship*. ASTM A131/A 131M. International. Pensilvania, USA: Editorial:(C) ASTM International, 2011.
16. Grong, O y Christensen, N. "Factors controlling GMAW weld metal". *Journal Metall.* 1983. vol. 12, p.155–165. ISSN 0026-0746
17. Vaidya, V. "Shielding gas mixtures for semiautomatic welds". *Welding Journal*. 2002, vol. 81, n° 9, p. 43–48. ISSN 0043-2296.
18. Brothers, H. "Core strength: switching to metal-cored wire for its welding operations increased both quality and productivity for a manufacturer". *Modern Applications News*. 2008, vol. 42, n° 9, [Consultado el: 10 de Febrero de 2012].
Disponible en: <http://news-business.vlex.com/vid/strength-switching-cored-wire-welding-56093310>
ISSN 0277-9951
19. Ebrahimnia, M., Goodarzi, M., Nouri, M., *et al.* "Study of the effect of shielding gas composition on the mechanical weld properties of steel ST 37-2 in gas metal arc welding". *Materials and Design*. 2009. vol. 30, p. 3891–3895. [Consultado el: 10 de Febrero de 2011].
Disponible en: <http://www.sinab.unal.edu.co:2053/science/article/pii/S026130690900137X>.
ISSN 0261-3069 .DOI 0.1016/j.matdes.2009.03.031
20. Zhang, C. H., Xia, Z., Yang, Z. *et al.* "Influence of prior austenite deformation and non-metallic inclusions on ferrite formation in low-carbon steels". *Journal of iron and Steel research*. 2010, vol. 17, n° 6, p. 36-42.
[Consultado el: 10 de Febrero de 2011].
Disponible en: <http://www.sinab.unal.edu.co:2053/science/article/pii/S1006706X10601112>.
ISSN 1006-706X.