

## **Estudio de productividad en la soldadura del acero *MIL A 46100* con los procesos *GMAW* y *SMAW***

### **Study of welding productivity for *MIL A 46100* steel weldments produced using *GMAW* and *SMAW***

*David Mazuera Robledo\**, *John Alberto Suárez Gómez*, *Jorge Enrique Giraldo Barrada*

Grupo de Soldadura, Universidad Nacional de Colombia, Calle 59A N.º 63-20 Bloque 03 Oficina 202, Medellín, Colombia

(Recibido el 10 de mayo de 2010. Aceptado el 17 de febrero de 2011)

#### **Resumen**

Se realizó un estudio para determinar la productividad en la soldadura de un acero bajo especificación MIL A 46100 al usar cinco procedimientos de soldadura (WPS) diferentes empleando el proceso de soldadura por arco con protección gaseosa (GMAW) en modo mecanizado y el proceso de soldadura por arco con electrodo revestido (SMAW). Para el proceso SMAW se utilizaron los electrodos E11018M diámetro de 2,4 mm y el electrodo E312-16 en diámetros de 2,4 y 3,2 mm. Para el proceso GMAW se usaron procedimientos con transferencias por aspersion y corto circuito. Las soldaduras con el proceso GMAW y el electrodo E312-16 de diámetro 3,2 mm fueron realizadas en un solo pase empleando respaldo de cobre, los demás procedimientos requirieron pulir la raíz de la junta antes de aplicar el segundo cordón. Se encontró que los WPS que utilizan el proceso GMAW son hasta cuatro veces más económicos que los procedimientos de SMAW y que los tiempos de producción de una junta con GMAW son del orden del 20% de los requeridos con SMAW, por tanto generan un potencial de aumento en la producción.

----- **Palabras clave:** GMAW (Gas Metal Arc Welding), SMAW (Shielding Metal Arc Welding), productividad, indicador de productividad

---

\* Autor de correspondencia: teléfono: + 57 + 4 + 430 92 71, fax: + 57 + 4 + 430 92 60/90 17, correo electrónico: jdmazuer@unal.edu.co (J.D. Mazuera)

## Abstract

A study was conducted to measure welding productivity for MIL A46100 specification steel joints welded following five different welding procedures (WPS) which used gas metal arc welding (GMAW), in mechanized mode, and shielded metal arc welding (SMAW). E110118M (2,4 mm in diameter) and E312-16 (2,4 and 3,2 mm in diameter) electrodes were used for SMAW. Spray and short circuit metal transfer modes were used for GMAW procedures. Single pass weldments were made using GMAW and SMAW (with E312-16  $\phi$  3,2 mm) procedures using copper baking plates; the remaining joints were done using two passes procedures needing root grinding prior to the second pass. It was found a cost reduction of up to 75% when GMAW procedures are used and the time for joint completion is reduced by nearly 80% when compared to the SMAW procedures leading to a potential increase in production rate.

----- **Keywords:** Gas metal arc welding, shielded metal arc welding, welding productivity, productivity measurement

## Introducción

El acero bajo especificación militar MIL A 46100 es utilizado para la fabricación de estructuras blindadas tales como tanques de guerra, buques etc. En un proyecto realizado por el Grupo de Soldadura de la Universidad Nacional de Colombia, Sede Medellín [1], se determinó que los electrodos E312-16 y E110118M son adecuados para soldar el acero MIL A46100 utilizando el proceso de soldadura por arco con electrodo revestido (SMAW); el cual es por el momento el único proceso utilizado en Colombia para la unión de dicho acero. A este proceso le son inherentes labores que demoran los tiempos de fabricación tales como cambios de electrodo, limpieza y remoción de escoria; además sus rangos de eficiencia de deposición, tasa de deposición y velocidad de aplicación son bajos en comparación con los de procesos de soldadura semiautomáticos como el de soldadura por arco con protección gaseosa (GMAW) y el de soldadura por arco con núcleo de fundente (FCAW).

Para lograr aumentos en la productividad en industrias que tienen como principal proceso de manufactura la soldadura es necesario revisar y atender los siguientes aspectos [2]:

- Reducción del tiempo de arco por junta soldada
- Reducción de desperdicios (consumibles de soldadura, material de aporte etc.), reproceso y rechazos
- Reducción de tiempos muertos

Por lo anterior, el uso de procesos de soldadura que tengan mayores valores de tasa de deposición, eficiencia de deposición y factor de operación tendrán un mayor potencial para lograr un incremento en la productividad. Las anteriores características son reunidas por procesos semiautomáticos como el GMAW y el FCAW [3-5].

En el presente estudio se determinaron la productividad y varios indicadores de productividad en la producción de una junta de láminas de acero MIL A46100 de 4,3mm de espesor y un metro de longitud usando cinco WPS diferentes empleando los procesos SMAW y GMAW, este último en modo mecanizado.

## Marco conceptual

### **Productividad**

La productividad es la relación entre la producción y los insumos necesarios para conseguir la misma, ecuación (1).

$$PRODUCTIVIDAD = \frac{PRODUCCION}{INSUMOS} \quad (1)$$

Es necesario tener claro que la productividad no es una medida de la cantidad que se ha fabricado, sino una medida de lo bien que se han combinado y utilizado los recursos para cumplir los resultados específicos deseables [6,7]. A menudo se hace uso de medidas parciales de productividad que son empleadas para el control de la producción y como referencia para la comparación entre procesos; estas medidas parciales se conocen como indicadores de productividad. Sin embargo, un indicador por sí solo no es suficiente para establecer que un proceso o método de producción es más eficaz ya que no toma en cuenta todos los insumos empleados para la producción.

Los insumos deben ser llevados a una misma unidad de medida para que la ecuación 1 sea consistente, razón por la cual es común que el denominador de dicha ecuación sea la suma del costo en pesos de cada uno de los insumos necesarios (mano de obra, materiales, energía, etc.) para obtener la producción. En este estudio dichos insumos están representados por los costos de soldadura.

#### *Indicadores de productividad*

En la industria de la soldadura es importante la productividad y se ha popularizado el uso de varios indicadores [2,3]. En el presente estudio se realizaron medidas de la tasa de deposición, el factor de operación y la eficiencia de deposición, además de la eficiencia del WPS y la tasa de deposición en producción que se definen conceptualmente en la discusión de resultados. Los demás indicadores utilizados se definen a continuación:

#### *Tasa de deposición*

Es la cantidad de metal de aporte que puede ser depositado por un electrodo o un alambre por unidad de tiempo, generalmente es expresado en kilogramos por hora. Esta medición se calcula

con base en el tiempo de arco, es decir, sin incluir paros para cambio de electrodo, limpieza de escoria, finalización de la soldadura u otras actividades.

#### *Factor de operación*

Es el porcentaje del tiempo total de trabajo de un soldador que realmente se utiliza para soldar. En otras palabras, es el tiempo de arco dividido por el tiempo total trabajado. Para el proceso SMAW el factor de operación puede variar entre el 15 y 40% dependiendo de las condiciones y los recursos de fabricación. En soldaduras producidas usando el proceso GMAW semiautomático, el factor de operación normalmente se encuentra entre el 45 y 55%; sin embargo, cuando se emplea GMAW automatizado, los factores de operación típicos van desde el 50% hasta cerca del 100% dependiendo del grado de automatización [3, 5].

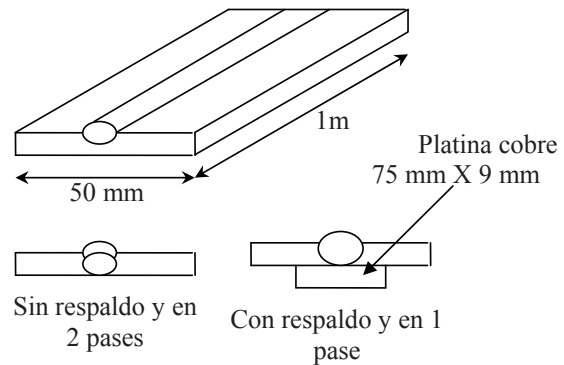
#### *Eficiencia de deposición*

Es la relación del peso del material depositado al peso del electrodo o el alambre consumido para hacer una soldadura. Para electrodos revestidos la eficiencia de deposición tal como es definida por la asociación americana de soldadura (AWS) y la que se reporta en la literatura no considera la pérdida de la colilla, lo cual es entendible si se tiene en cuenta que el tamaño de la colilla puede ser variable. Sin embargo, desde el punto de vista de los costos de soldadura es necesario considerar para la eficiencia de deposición las pérdidas en las colillas ya que éstas constituyen un desperdicio real de material que tiene un costo que puede llegar a ser significativo.

#### **Experimentación**

Se utilizaron cinco WPS diferentes para unir chapas de acero MIL A 46100 de 4,3 mm de espesor en posición plana (figura 1) distribuidos así: (a) dos WPS de GMAW (uno en transferencia por cortocircuito y otro en transferencia por aspersión) y uno de SMAW con el electrodo

E312-16  $\phi$  3,2 mm (1/8”), que requieren platina de respaldo de cobre y en los cuales la unión se realiza en un solo pase; y (b) dos WPS de SMAW con electrodos E11018M y E312-16 de  $\phi$  2,4 mm (3/32”) que requieren dos cordones de soldadura y el pulido de la raíz antes de depositar el segundo cordón por el respaldo de la platina. La remoción de escoria, limpieza y repelado de las juntas se llevó a cabo mediante el uso de herramientas manuales (piquetas, cepillos de acero) y pulidora con disco abrasivo. Los parámetros de soldadura de los WPS utilizados se presentan en la tabla 1.



**Figura 1** Esquemas de las juntas y cupones de soldadura

**Tabla 1** Parámetros de soldadura de los WPS estudiados

<i>Variables Esenciales</i>		<i>WPS</i>				
		<i>SMAW</i>			<i>GMAW</i>	
		<i>1</i>	<i>2</i>	<i>3</i>	<i>4</i>	<i>5</i>
		E11018M Ø2,4mm	E312-16 Ø2,4mm	E312-16 Ø2,4mm	ER100S1 Corto circuito	ER100S1 Aspersión
Aporte		E11018M	E312-16	E312-16	ER100S1	ER100S1
<i>Parámetros registrados del procedimiento</i>	Diámetro del electrodo f [mm]	2,4	2,4	3,2	1,14	1,14
	Longitud del electrodo [mm]	305	356	305	N.A	N.A
	Polaridad	CDEP	CDEP	CDEP	CDEP	CDEP
	Voltaje [v]	25	29	23	20	32
	Intensidad de corriente [A]	80	90	76	200	315
	Velocidad de aplicación [mm/min]	102	102	127	305	559
	Protección gaseosa	N.A	N.A	N.A	75%Ar-25%CO <sub>2</sub>	98%Ar-2%O <sub>2</sub>
	Flujo de gas [L/min]	N.A	N.A	N.A	14	17
	Nº Pases	2	2	1	1	1
	Abertura de raíz [mm]	2-2,5	2-2,5	3,2	3	2
Respaldo de cobre		NO	NO	SI	SI	SI
<i>Parámetros para cálculo de indicadores</i>	Peso material consumido [g]	181	326	196	185	155
	Peso material depositado [g]	85	130	80	170	130
	Peso de las colillas[g]	26,6	26,8	38	N.A	N.A
	Tiempo de finalización de la junta [min]	25,3	37,1	22,6	4,1	2,1
	Tiempo de arco [min]	9,6	10,1	7,9	3,5	1,5
	Tiempos muertos [min]	15,7	27	14,7	0,6	0,6

Para el cálculo de la productividad, se midieron las siguientes variables: Peso del material de aporte consumido, tiempo de elaboración de la junta, consumo de energía eléctrica y consumo de gases de protección (en el caso de GMAW). Para los indicadores de productividad se requiere medir además las siguientes variables: tiempo de arco, tiempos muertos (tiempo de cambio de electrodo, tiempo de limpieza -remoción de escoria más limpieza final-, giro de la junta), peso de las colillas y peso de material depositado.

Los equipos empleados para realizar las mediciones y llevar a cabo las pruebas fueron:

- Fuente de soldadura KEMPI MARC 500 HF
- Alimentador de GMAW KEMPI MARC FU 30
- Fuente de soldadura MILLER XMT 300
- Pinza amperimétrica (600 A, ± 0,1A)
- Voltímetro (0-50 V ± 0,01V)
- Cronometro (1h ± 0,01s)
- Carro para soldadura mecanizada
- Balanza electrónica para pesar juntas (20kg ± 5g)
- Balanza analítica para peso de electrodos (300g ± 0,1g)

## Resultados y discusión

Debido a las limitaciones que presentan los indicadores de productividad tratados comúnmente en el área de la soldadura para evaluar un proceso de producción y WPS específicos, se definieron los siguientes indicadores no manejados por la literatura técnica consultada:

- Eficiencia de deposición del WPS

Como ya se mencionó, en la eficiencia de deposición AWS y en la reportada en la literatura no se tienen en cuenta las pérdidas en las colillas ni las pérdidas de material de aporte removido

en las soldaduras de múltiples pases [2- 4, 8]. De lo anterior, se desprende que tales pérdidas son inherentes a cada WPS dado que la cantidad de material que se debe remover en una soldadura multipase depende del diseño de la junta y el número de pases, que a su vez depende del diámetro de los electrodos utilizados, variable que también influye en la longitud de las colillas [3]. La eficiencia de deposición del WPS se define por la ecuación (2)

$$\text{Eficiencia WPS} = \frac{\text{Peso del metal depositado en la junta}}{\text{Peso de los electrodos consumidos}} \quad (2)$$

- Tasa de deposición en producción

La definición de Tasa de deposición, como se presentó en el marco conceptual, está definida en operación continua, es decir, sin contemplar tiempos muertos que pueden cambiar considerablemente de un proceso productivo a otro y los cuales podrían ser reducidos realizando cambios en los diseños de las juntas o en los procesos de soldadura utilizados. Por tanto, a fin de realizar comparaciones entre diferentes procesos productivos para obtener un mismo producto, es más adecuado definir el indicador tasa de deposición en producción, ecuación (3), que relaciona la masa de metal de soldadura depositado por cada hora de trabajo dentro de un proceso productivo particular.

$$\text{Tasa de deposición en producción} = \frac{\text{Masa de metal depositado en la junta}}{\text{Tiempo de finalización de la junta}} \quad (3)$$

Usando las definiciones de los indicadores de productividad del marco conceptual y los indicadores propuestos en esta discusión, se obtuvieron los valores presentados en la tabla 2. Se puede observar que para los WPS que utilizan el proceso SMAW la eficiencia de deposición puede tener variaciones de hasta el 10% cuando no se tienen en cuenta las pérdidas en las colillas y se pueden tener variaciones de hasta el 15% entre la eficiencia de deposición real para un WPS y aquella reportada en la literatura para el



consumible empleado. Como se esperaba, para el electrodo E11018M (ferrítico con polvo de hierro) la eficiencia de deposición es superior a la de los aportes E312-16 (aporte inoxidable) como consecuencia del polvo de hierro en el revestimiento del primero. Adicionalmente, se encontró que las eficiencias de deposición del WPS para el proceso SMAW con los aportes E312-16 sin considerar las colillas son mayores para el diámetro de 3,2mm(1/8”), pero considerando las colillas son similares debido a que los electrodos de menor diámetro presentan mayor calentamiento por resistencia y por tanto sus colillas son más largas. Finalmente, los valores de eficiencia de deposición para el proceso GMAW son superiores (e incluso 2 veces mayores) a los del proceso SMAW. Sin embargo, al comparar los datos obtenidos para la eficiencia de deposición para GMAW con aquellos reportados en la literatura se observa una discrepancia que se hace más pronunciada para la transferencia por aspersión, lo cual puede ser consecuencia de la resolución (+/- 5g) de la balanza utilizada para pesar el material de aporte consumido en cada soldadura.

También se puede ver en la tabla 2 que el factor de operación para los WPS que utilizan el proceso GMAW presentan una diferencia considerable debido a que el tiempo de limpieza es igual para ambos casos mientras que el tiempo de arco del WPS 5 (aspersión) es aproximadamente la mitad del tiempo de arco del WPS 4 (corto circuito) dada la mayor velocidad de soldadura utilizada por el primero; tomando sólo como referencia este indicador se puede hacer una mala interpretación poniendo al WPS en aspersión en una posición de desventaja (desde el punto de vista productivo) que realmente no existe. Adicionalmente, resulta evidente la diferencia en factor de operación entre los procesos GMAW y SMAW sugiriendo que cuando se emplea el primero se reducen considerablemente los tiempos muertos y por tanto la mayor parte del tiempo consumido para terminar una junta corresponde al tiempo en que el se transfirió metal de aporte. Con respecto a los WPS que emplean el proceso

SMAW se ha encontrado que los factores de operación de los electrodos ferríticos con polvo de hierro (E11018M) son mayores que en los electrodos inoxidables (E312-16). Este resultado es consecuencia de una mayor eficiencia de deposición, que en principio, reduciría tiempos muertos; esta afirmación se complementa con el hecho de que aportes de mayor diámetro poseen mayores factores de operación. Se observó además que a mayor diámetro del electrodo se obtienen mejores factores de operación como consecuencia del ya mencionado calentamiento por resistencia que conlleva a menores tiempos de arco para los electrodos de menor diámetro.

Respecto a la tasa de deposición estandarizada, se encontró (como se esperaba) que los procedimientos que emplean el proceso GMAW presentan un valor tres veces superior al de los WPS que emplean el proceso SMAW. Sin embargo, al comparar las tasas de deposición en producción se encontró que las de GMAW son 10 veces mayores que las de SMAW, proceso para el cual la tasa de deposición en producción fue aproximadamente constante e independiente del tipo y diámetro de electrodo; esto como consecuencia de la cantidad de material removido durante el repelado de la junta y los demás tiempos muertos asociados con el proceso SMAW.

### ***Medición de la productividad***

Para el cálculo de la productividad de acuerdo con lo expuesto en el marco conceptual fue necesario conocer el costo y la cantidad de los insumos empleados para realizar las soldaduras con cada uno de los WPS. Es necesario aclarar que para este estudio no se tuvieron en cuenta los gastos generales ni los costos de labor asociados con ayudantes, montadores, inspectores, supervisores y demás personal asociado con soldadura; ya que para las condiciones de este estudio dichos costos no eran cuantificables al ser estos particulares para cada industria y proceso de producción. En este trabajo esos costos no cuantificables se han supuesto constantes y se ha centrado la atención en el impacto en la productividad que tendría el

cambio del procedimiento de soldadura utilizado. Por lo tanto los costos de soldadura aquí calculados corresponden a los costos de los insumos inherentes al proceso de soldadura. En la figura 2 se presenta el costo total (suma de los costos de los insumos) para producir un metro de soldadura y en la figura

3 el índice de productividad para cada uno de los WPS estudiados, el cual se calculó tomando como referencia el WPS 2 (SMAW E312-16 φ2,4mm) que es el que se ha recomendado como el más conveniente para la soldadura del acero MIL A46100 [1].

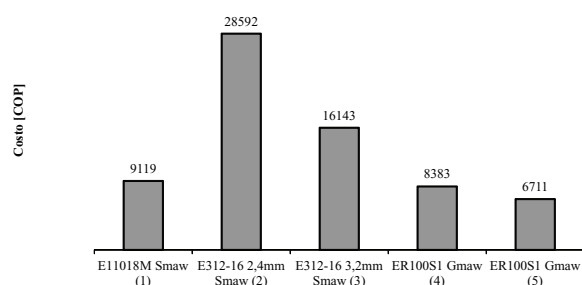
**Tabla 2** Indicadores de productividad obtenidos para los WPS ensayados

Indicadores	WPS				
	SMAW		GMAW		
	1	2	3	4	5
	E11018M	E312-16	E312-16	ER100S1	ER100S1
Eficiencia de deposición[%]	60 <sup>1</sup>	55 <sup>1</sup>	N.R <sup>3</sup>	96 <sup>2</sup>	98 <sup>2</sup>
Eficiencia de deposición del WPS sin considerar colillas [%]	55	43	51	92	84
Eficiencia de deposición del WPS considerando colillas [%]	47	40	41	N.A	N.A
Tasa de deposición [kg/h]	0,761	0,821	N.R3	2,492	4,632
Tasa de deposición en producción [kg/h]	0,2	0,21	0,22	2,65	3,71
Factor de operación [%]	38	27	35	85	72

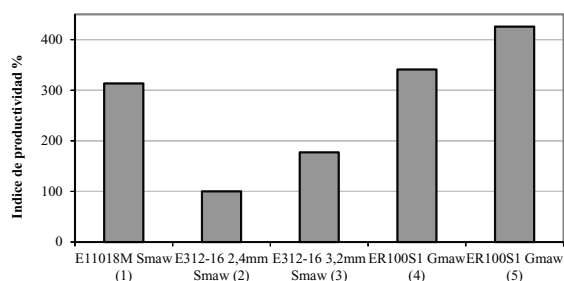
<sup>1</sup> Tomado de la referencia [1]

<sup>2</sup> Tomado de la referencia [3]

<sup>3</sup> No se encontró registro en la literatura



**Figura 2** Costo de producción en COP para cada WPS

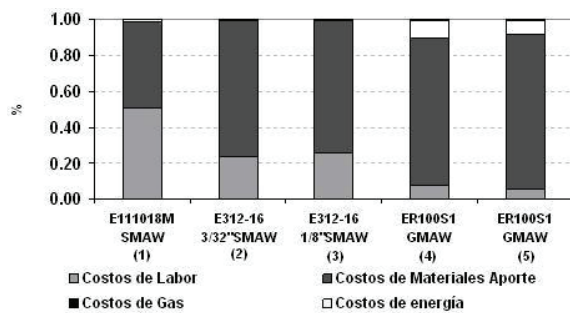


**Figura 3** Índice de productividad de cada WPS

En la figura 3 se puede observar el incremento que se obtiene en la productividad cuando, para soldar las láminas de acero MIL A 46100, el WPS 2 es reemplazado por cada uno de los demás procedimientos evaluados en este estudio (WPS 1,3,4 y 5). Se destaca el incremento obtenido con los WPS 1,4 y 5 en orden creciente; aunque los costos y el incremento en la productividad para los WPS 1 y 4 son similares es necesario notar que el tiempo de finalización de la junta es cinco veces mayor para el WPS 1, esto quiere decir que el uso del WPS 4 además de un incremento en la productividad es más eficiente en el uso del tiempo, con lo cual se puede obtener un mayor número de uniones soldadas por jornada de trabajo siempre que las demás etapas del proceso productivo se adapten a la nueva velocidad de producción.

La estrategia para incrementar la productividad de un proceso consiste en disminuir el costo de producción (denominador de la ecuación 1); sin

embargo es necesario tener en cuenta que cada insumo tiene un peso (ponderación) dentro del costo total de producción de un producto dado. En la figura 4 se presenta el porcentaje que representa cada insumo dentro del costo total de cada uno de los WPS estudiados. Se puede notar que para los WPS que utilizan proceso GMAW el porcentaje del costo total representado por los gastos de mano de obra es mucho menor que para los WPS que utilizan proceso SMAW; lo que indica que casi todo el costo de fabricación está representado por las materias primas. Se debe tener claro que los porcentajes muestran los insumos que más inciden en los costos de fabricación y que por lo tanto en ellos se debe centrar cualquier estudio tendiente a reducir los costos de producción e incrementar la productividad; sin embargo, como se puede ver en la figura 4 los WPS 2 y 3 tienen la misma distribución de porcentajes mientras que su índice de productividad es considerablemente diferente (el WPS 3 es 77,2 % más productivo), por ello debe observarse cuidadosamente para no inferir diferencias en la productividad a partir de la distribución de porcentajes mencionada.



**Figura 4** Porcentaje del costo total representado por cada insumo

## Conclusiones

Los WPS que emplearon el proceso GMAW en modo mecanizado mostraron ser más productivos que aquellos que utilizaron el proceso SMAW y adicionalmente mostraron un potencial de incremento en la capacidad de producción al disminuir el tiempo de terminación de un producto con lo que se obtiene una reducción en

el porcentaje del costo total ocupado por la mano de obra.

Se mostró que la eficiencia de deposición AWS al no contabilizar las pérdidas en las colillas, que en este estudio fueron de hasta el 15%, no debe ser usada para cálculos de costos de soldadura y productividad. Por tanto, para obtener una medida confiable, se propuso el uso de un nuevo indicador denominado eficiencia de deposición del WPS que tiene en cuenta además de las pérdidas en las colillas el material que es removido con pulidora en las soldaduras multipases.

Con respecto a la tasa de deposición, se mostró que los valores encontrados en la literatura no tienen en cuenta los tiempos muertos de un proceso productivo por lo que se propuso un indicador más acertado denominado tasa de deposición en producción. Este indicador se puede estimar al multiplicar la tasa de deposición estandarizada por el factor de operación del proceso, de esta manera se pudo determinar la cantidad de metal que se deposita por cada hora de trabajo de la planta.

Finalmente se observó que los indicadores de productividad en soldadura son útiles para comparar procesos de soldadura, por ejemplo SMAW Vs. GMAW, pero no son suficientes para realizar comparaciones de productividad entre diferentes procesos productivos por ser medidas parciales de productividad.

Los trabajos futuros en esta área deberán estar encaminados a las mediciones de productividad en un entorno productivo dado, de tal manera que se puedan cuantificar aquellos insumos que en este estudio fueron asumidos constantes.

## Referencias

1. Universidad Nacional de Colombia Sede Medellín. *Estudio de la soldabilidad de aceros microaleados utilizados en la construcción y reparación de embarcaciones*. Proyecto de investigación. Medellín. 2005. pp. 1-70.
2. American Welding Society. *Welding-Related Expenditures, Investments, and Productivity Measurement in U.S. Manufacturing, Construction,*



- and Mining Industries*. 2002. pp 1-35. Curso en línea. Consultada el 10 de agosto de 2005.
3. American Welding Society. *Design and planning manual for cost-effective welding*. Miami. 1999. pp. 281.
  4. H. Cary. *Arc welding automation*. Ed Marcel Dekker. New York. 1995. pp. 40-66.
  5. D. Bain. *Productividad*. Ed. Mc Graw-Hill. México. 1986. pp. 1-68.
  6. E. Felsing, P. Runza. *Productividad: un estudio de caso en un departamento de siniestros*. Tesina de maestría. Universidad del CEMA. Buenos Aires. 2002. pp. 1-29.
  7. American Welding Society. *Final Report Welding Supervisor Training and Certification*. Miami. 2003. pp. 1-24.