

**COMPORTAMIENTO DE LA DUREZA EN LA ZONA AFECTADA
TÉRMICAMENTE DURANTE SOLDADURA DE ACERO AISI 4130
ENDURECIDO MEDIANTE TRATAMIENTO TÉRMICO**

**STUDY OF THE HARDNESS IN THE HEAT AFFECTED ZONE IN WELDING
OF A 4130 AISI STEEL HARDENED BY HEAT TREATMENT**

Jorge Guerra-Álvarez^{1}, Juan A. Pozo-Morejón², Amado Cruz-Crespo²
y Jorge V. Miguel-Oria²*

¹ Empresa Planta Mecánica Fabric Aguilar Noriega, Calle A no. 39 e/c, Arroyo Carrascal y Carretera a
Planta Mecánica, Zona Industrial Noroeste, Ciudad de Santa Clara, Villa Clara, Cuba.

² Centro de Investigaciones de Soldadura (CIS), Facultad de Ingeniería Mecánica e Industrial, Universidad
Central "Marta Abreu" de Las Villas, Carretera a Camajuaní km 5 ½, Santa Clara, Villa Clara, Cuba.

Recibido: Enero 31, 2018; Revisado: Febrero 22, 2018; Aceptado: Junio 12, 2018

RESUMEN

En el presente estudio se evalúa el efecto de la corriente de soldadura (aporte de calor) y la temperatura de precalentamiento sobre el comportamiento de la dureza mínima en la zona afectada térmicamente, de un acero AISI 4130 (30XMA) en estado inicial de tratamiento térmico a máxima dureza. Para ello se realizan diferentes depósitos sobre chapa, con el empleo del proceso de soldadura con electrodo fusible y protección gaseosa, GMAW, en correspondencia con un diseño de experimento tipo factorial. Como resultado se establece una ecuación de regresión y un nomograma que permiten predecir la dureza mínima en la zona afectada térmicamente. Se concluye que la dureza mínima en la zona estudiada desciende a medida que aumenta la corriente de soldadura y la temperatura de precalentamiento, lo que puede afectar su comportamiento en servicio cuando es sometida a impactos a alta velocidad.

Palabras clave: Acero aleado, dureza, GMAW, ZAT.

ABSTRACT

In present study the effect of welding current (heat input) and preheating temperature on minimum hardness behavior in 4130 AISI (30XMA) steel in initial state of thermal treatment at maximum hardness heat affected zone is evaluated. Different deposits on sheet metal are made, using a welding process with consumable electrode and gaseous protection, GMAW, in correspondence with a factorial experiment design. As result,

Copyright © 2019. Este es un artículo de acceso abierto, lo que permite su uso ilimitado, distribución y reproducción en cualquier medio, siempre que la obra original sea debidamente citada.

* Autor para la correspondencia: Jorge Guerra-Álvarez, Email: jorge@plantamec.co.cu

was obtained a regression equation and a nomogram that allow to predict the minimum hardness in the heat affected zone. It was concluded that the minimum hardness in the studied zone decreases as the welding current and the preheating temperature increases, which can affect its service behavior when subjected to high speed impacts.

Key words: Alloy steel, GMAW, hardness, HAZ.

1. INTRODUCCIÓN

Para la fabricación de medios, cuyo uso fundamental está vinculado a soportar la penetración de cuerpos a elevada velocidad, se emplean comúnmente los aceros de medio contenido de carbono y baja aleación, con tratamiento térmico de temple más revenido bajo a máxima dureza. La principal problemática durante la soldadura de estos aceros la constituye su tendencia a la fisuración en frío, así como al reblandecimiento que ocurre en la zona afectada térmicamente (ZAT), lo que puede comprometer su servicio o su resistencia a la penetración de cuerpos a alta velocidad.

Generalmente los autores, como (Castilla y Unfried, 2008) y (Mazuera y col., 2011), refieren que la microestructura de la ZAT de una unión soldada sobre estos aceros tratados térmicamente a máxima dureza está constituida por cuatro subzonas: una primera adyacente a la zona fundida llamada sobrecalentada, o de grano grueso, calentada muy por encima de A_{C3} , seguida de una subzona de grano fino calentada algo por encima de A_{C3} , una denominada de recristalización incompleta, calentada entre A_{C1} y A_{C3} y finalmente una adyacente al metal base no afectado, calentada por debajo de A_{C1} , o sobrerrevenida.

La subzona sobrecalentada de grano grueso presenta una elevada dureza y está formada por martensita transformada que sufre un calentamiento hasta alta temperatura y un enfriamiento rápido. La subzona de recristalización incompleta sufre el mayor reblandecimiento o caída de la dureza, por lo que constituye la más vulnerable al impacto de cuerpos a alta velocidad. Finalmente, la subzona sobrerrevenida presenta una estructura de martensita sobrerrevenida, con diferentes valores de dureza, dependiendo de la temperatura de revenido alcanzada, de tal modo que la dureza se va recuperando en la medida que aumenta la distancia del punto analizado a la zona fundida, hasta llegar al valor de dureza del metal base no afectado, lugar que se reconoce como frontera exterior de la ZAT, (Castilla y Unfried, 2008) y (Mazuera y col., 2011).

La presente investigación tiene como objetivo establecer la relación que vincula el valor de la corriente y de la temperatura de precalentamiento con la dureza mínima de la ZAT en la soldadura GMAW del acero AISI 4130 (30XMA), de medio carbono y baja aleación, con tratamiento térmico inicial de temple y revenido a máxima dureza. El trabajo se propone, además, la elaboración de un nomograma tecnológico para predecir la dureza mínima de la ZAT en función de las variables del procedimiento de soldadura.

2. MATERIALES Y MÉTODOS

2.1 Materiales

La Tabla 1 muestra el rango especificado de composición química de un acero AISI 4130 (30XMA), similar al empleado como metal base en el presente estudio, la cual se corresponde con el sistema C – Cr – Mo, Cary (1994); (Sorokin y col., 2001).

Tabla 1. Composición química del acero, en por ciento de masa

<i>C</i>	<i>Si</i>	<i>Mn</i>	<i>Cr</i>	<i>Mo</i>
0,28-0,33	0,20-0,35	0,4-0,6	0,8-1,1	0,15-0,25

El metal de aporte utilizado para la realización de la unión soldada es un alambre tubular de alta resistencia del tipo metal cored, OK TUBROD 110 MC, que garantiza una resistencia de 850 MPa y una elongación relativa de 18 %, ESAB (2014). Según especificación AWS este aporte es clasificado como E 110 C G, ESAB (2014). De acuerdo con ESAB (2014) el consumible debe ser aplicado en base a las siguientes indicaciones generales: empleo de corriente directa, electrodo conectado al polo positivo, gas de protección 75 % Ar + 25 % CO₂, soldadura en todas posiciones. Este electrodo garantiza un hidrógeno difusible menor que 4 mL/100g de metal depositado.

2.2 Planificación experimental

Se han considerado como variables independientes “X_i” del estudio, la corriente de soldadura y la temperatura de precalentamiento, para las que se consideran los niveles de la Tabla 2.

Tabla 2. Descripción de las variables independientes del diseño de experimentos

<i>Variable</i>	<i>Nombre de la variable</i>	<i>X_{min}</i>	<i>X_o</i>	<i>X_{máx}</i>
X ₁	Corriente de soldadura, A	150	240	330
X ₂	Temp. precalentamiento, °C	30	115	200

De acuerdo con el fabricante del electrodo ESAB (2014), para un diámetro del electrodo de 1,2 mm, la corriente de soldadura debe enmarcarse en el rango de 150 a 330 A, por lo que se decide que esta variable asuma estos valores extremos, además de un nivel medio de 240 A.

En el caso de la temperatura de precalentamiento se asume como valor máximo el de 200 °C, que constituye la temperatura de revenido del tratamiento térmico inicial de la chapa, que garantiza la dureza requerida para soportar los impactos a alta velocidad. Para esta variable se considera, además, el valor mínimo de la temperatura ambiente, 30 °C, y un valor intermedio entre los anteriores. El número de experimentos a realizar es de 9 (N=3^k, donde “N” es la cantidad de experimentos, “k” es el número de variables). Como variable respuesta fue considerada la menor dureza Vickers en la ZAT, determinada empleando una carga de 4,9 N (500 gramos fuerza), HV 500, para lo que fueron realizados perfiles de dureza a través de dicha zona. Para el análisis de regresión y la obtención del modelo matemático y superficie respuesta, fue considerado este valor mínimo de dureza dentro del perfil en la ZAT de cada muestra, ya que constituye la

subzona de mayor afectación posible para resistir la penetración de cuerpos a elevada velocidad.

La Tabla 3 muestra el diseño de tipo factorial que reproduce el plan experimental.

Tabla 3. Matriz experimental del diseño

No	X ₁	X ₂	X ₁	X ₂
1	+	+	330	200
2	+	-	330	30
3	-	+	150	200
4	-	-	150	30
5	+/-	+/-	240	115
6	+	+/-	330	115
7	-	+/-	150	115
8	+/-	+	240	200
9	+/-	-	240	30

2.3 Obtención y preparación de muestras

Fueron realizados depósitos sobre chapas de 200x200x6 mm, en base al plan experimental de la Tabla 3, con una tensión de 30 V, una velocidad de soldadura de 5 mm/s, un flujo de gas de protección de 18 L/min y una distancia pieza – boquilla de contacto de aproximadamente 12 mm. La temperatura de precalentamiento de la chapa fue medida con un pirómetro infrarrojo, con resolución de $\pm 0,1$ °C, tomada a una distancia de 10 a 20 mm del borde del cordón, como se recomienda por norma, ONN (2004).

De los depósitos correspondientes a cada condición experimental de la Tabla 3 fueron extraídas muestras para el estudio de dureza, mediante cortes transversales al depósito soldado, realizados en el centro de la chapa empleando una tronzadora metalográfica. Se realizó la preparación para macrografía, atacando con nital al 2 %. Fue realizado el perfil de dureza Vickers de la sección transversal de la ZAT, tomando como coordenada cero el borde de la zona fundida para la medición de la distancia al punto dado (Figura 1). A cada condición experimental se le realizaron tres réplicas.

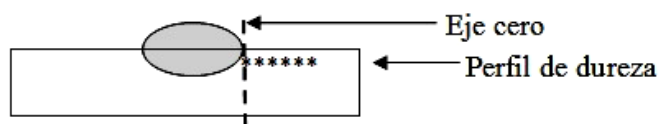


Figura 1. Esquema del perfil de durezas Vickers

3. RESULTADOS Y DISCUSIÓN

3.1 Efecto de la corriente de soldadura y el precalentamiento sobre la dureza de la ZAT

En las Figuras 2, 3, 4 se muestran los perfiles de dureza HV 500 en función de la distancia del borde de la zona fundida hasta el punto en cuestión, abarcando toda la ZAT para cada condición de soldadura.

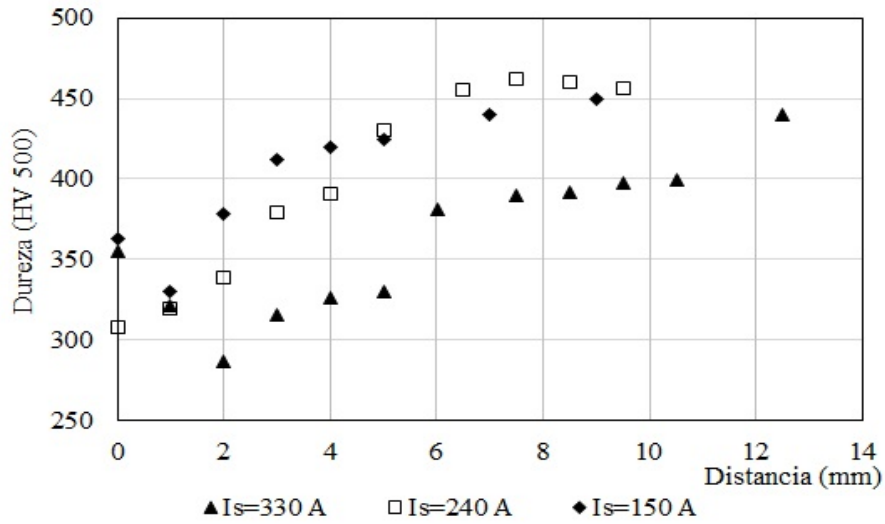


Figura 2. Comportamiento de la dureza HV 500 en la ZAT en función de la corriente de soldadura, sin precalentamiento

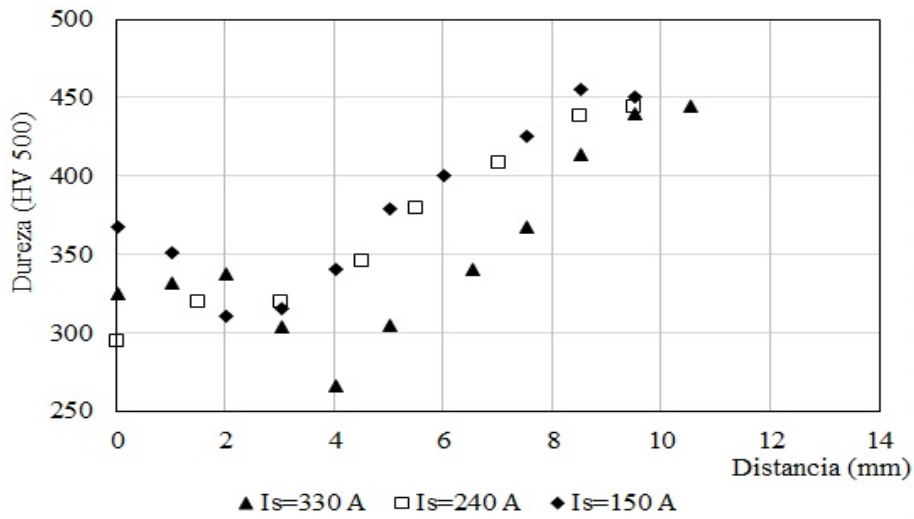


Figura 3. Comportamiento de la dureza HV 500 en la ZAT en función de la corriente de soldadura, con precalentamiento de 115°C

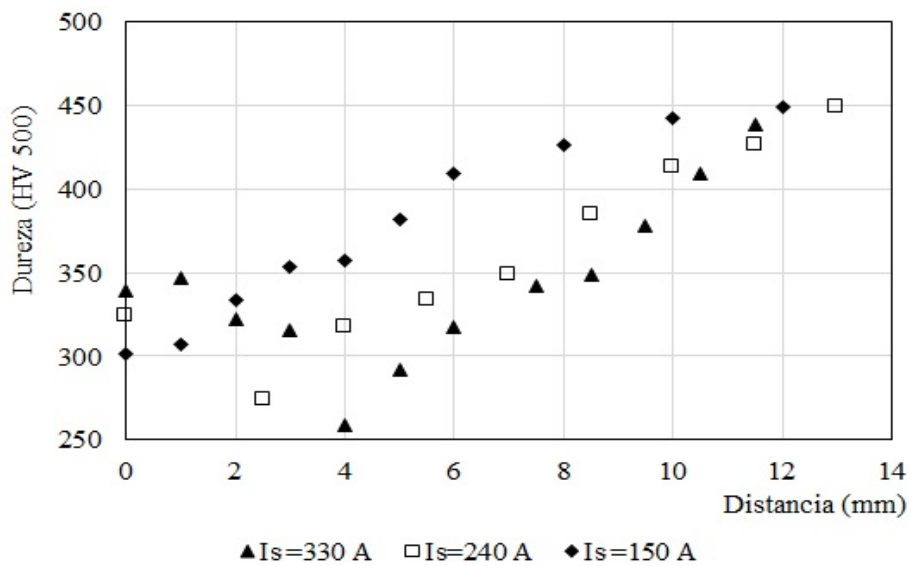


Figura 4. Comportamiento de la dureza HV 500 en la ZAT en función de la corriente de soldadura, con precalentamiento de 200°C

La configuración de los perfiles de dureza obtenidos en la ZAT (Figuras 2, 3 y 4) coincide con los reportados en la literatura, como (Mazuera y col., 2011), con una subzona de elevada dureza adyacente a la zona fundida (sobrecalentada), a cierta distancia de esta una subzona de dureza mínima (recristalización incompleta), que se calienta entre Ac_1 y Ac_3 y una subzona más alejada, donde la dureza se recupera gradualmente en la medida que aumenta la distancia (sobrerrevenida). Según la literatura, en la zona de recristalización incompleta la martensita de partida se transforma parcialmente en estructuras más estables de menor dureza, producto del ciclo térmico de soldadura, que alcanza una temperatura máxima que no supera Ac_3 , con velocidades de enfriamiento inferiores a la de la subzona sobrecalentada, (Castilla y Unfried, 2008) y (Mazuera y col., 2011).

De las Figuras 2, 3, 4 se desprende que la dureza de partida del acero con tratamiento térmico a alta dureza es de alrededor de 450 HV 500, la que garantiza la resistencia a los impactos a alta velocidad. Sin embargo, la dureza cae hasta un valor mínimo en la ZAT, producto del ciclo térmico de soldadura, que oscila de 260 HV 500 para la condición experimental 1 (representa una caída de aproximadamente el 42 % del valor de partida), hasta 330 HV 500 para la condición experimental 4 (representa una caída de aproximadamente el 27 % del valor de partida). De este modo, los cambios en las variables del procedimiento de soldadura provocan que la dureza mínima en la ZAT varíe en un rango de 70 HV 500, determinado por dichas condiciones experimentales. El procesamiento estadístico de los resultados permitió arribar a la ecuación de regresión 1, que permite predecir la dureza en la ZAT a partir de las variables del procedimiento de soldeo, corriente de soldadura y temperatura de precalentamiento.

$$HV\ 500 = 373,439 - 0,232771 \cdot I_s - 0,286505 \cdot T_p - 0,0000205761 \cdot I_s^2 + 0,0000326797 \cdot I_s \cdot T_p + 0,000461361 \cdot T_p^2; \text{ con } R^2_{aj} = 96,3\% \quad (1)$$

Para una mejor visualización del comportamiento de las variables se construyó el gráfico de superficie respuesta de la Figura 5.

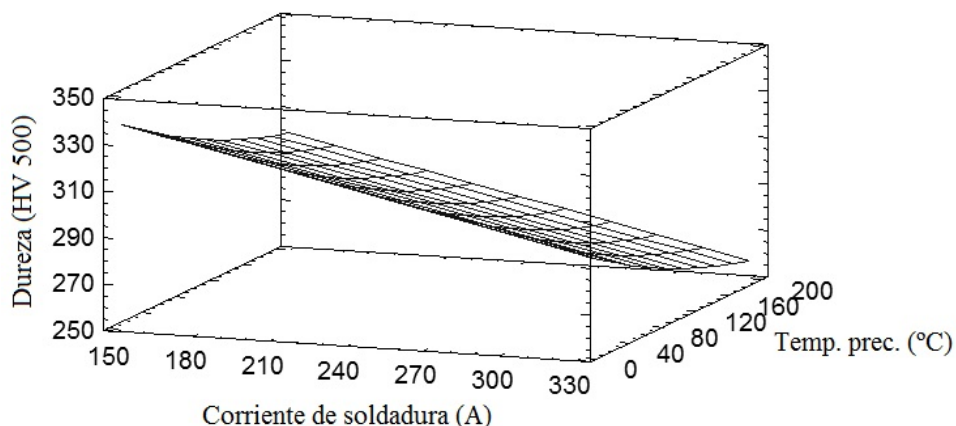


Figura 5. Comportamiento de la dureza Vickers de la ZAT en función de la corriente de soldadura y la temperatura de precalentamiento

En las Figuras 2, 3, 4, 5 se observa que la dureza mínima en la ZAT desciende a medida que aumenta la temperatura de precalentamiento y la corriente de soldadura (calor introducido), lo que significa que esta se reblandece más localmente, algo que puede afectar el comportamiento del acero en servicio sometido a impactos a alta velocidad según Department of defense (1987), (Madhusudhan y col., 1998) y Department of defense (2011). Este comportamiento de la dureza se asocia a la formación parcial de estructuras más estables en la subzona de recristalización incompleta, debido a un mayor tiempo de permanencia a una temperatura entre A_{C1} y A_{C3} , a causa de una mayor corriente de soldadura aplicada, que aumenta el calor introducido y reforzado por una temperatura de precalentamiento en aumento, que reduce el gradiente térmico entre la zona fundida y el metal base.

El efecto de la variable corriente de soldadura sobre la dureza mínima en la ZAT es ligeramente más acentuado que el de la temperatura de precalentamiento, lo que se desprende de la ecuación 1 y de la Figura 5.

3.2 Obtención de nomograma de uso tecnológico

El poder contar con un nomograma para predecir la dureza mínima de la ZAT, a partir de las variables del régimen, es de utilidad para el establecimiento de los procedimientos de soldadura a emplear en su unión. Entonces, como parte de este estudio se ha generado el nomograma de la Figura 6.

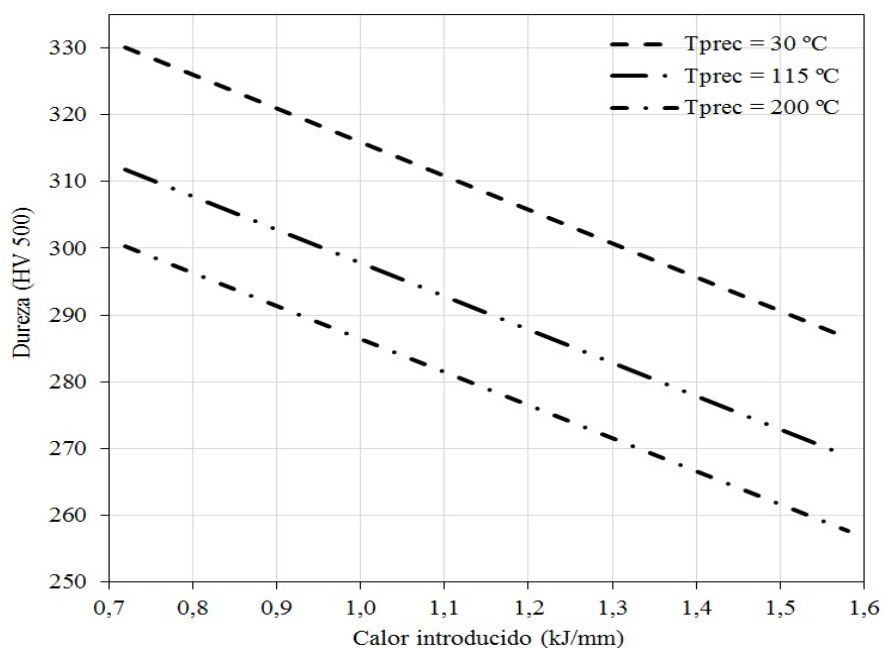


Figura 6. Nomograma para estimar la dureza HV 500 de la ZAT durante la soldadura GMAW de chapas de 6 mm de espesor, de acero AISI 4130 (30XMA), en función del calor introducido y la temperatura de precalentamiento

Dicho nomograma, para uso tecnológico en la industria, permite definir el calor aportado (establecer la combinación de corriente, tensión y velocidad) y la temperatura de precalentamiento para obtener una dureza mínima deseada en la ZAT, durante la soldadura GMAW en chapas de 6 mm de espesor. El empleo del nomograma permite también predecir, para una condición de variables de procedimiento de soldadura conocidas, la dureza mínima en la ZAT.

4. CONCLUSIONES

1. La dureza de partida del acero, con tratamiento térmico a alta dureza, es de alrededor de 450 HV 500, la que cae hasta un valor mínimo en la ZAT, producto del ciclo térmico de soldadura, de 260 HV 500, para la condición experimental de máxima corriente y temperatura de precalentamiento durante la soldadura GMAW, lo que representa una disminución de aproximadamente el 42 %. Lo anterior puede afectar la resistencia a la penetración de cuerpos a elevada velocidad.
2. Para la condición experimental de soldadura, con mínima corriente y temperatura de precalentamiento, la dureza mínima en la ZAT cae hasta 330 HV 500, lo que representa una caída de aproximadamente solo el 27 % del valor de partida, que debe garantizar una condición más favorable para el servicio en relación a la condición de máxima corriente y temperatura de precalentamiento.
3. La ecuación de regresión y el nomograma obtenidos permiten predecir la dureza mínima en la ZAT, durante la soldadura GMAW del acero AISI 4130 (30XMA), con 6 mm de espesor y tratamiento térmico inicial de temple y revenido a máxima dureza, por lo que constituyen herramientas para el ajuste de las variables del procedimiento de soldadura.

REFERENCIAS

- Cary, H., *Modern welding technology.*, Third Edition, Regents/Prentice Hall, Englewood Cliffs, New Jersey, 1994, pp. 1-780.
- Castilla, I., y Unfried, J., *Soldabilidad de un acero microaleado utilizando el proceso SMAW y metal de aporte ferrítico de alta resistencia.*, Ciencia & Tecnología de Buques, Cartagena, Colombia, Vol. 2, No 3, 2008, pp. 25-38.
- Department of defense., MIL-STD-3038 Test Methods for Ballistic Defeat Material, 2011, pp. 1-16
- Department of defense., MIL-STD-662F V50 Ballistic Test for Armor, 1987, pp.1-18.
- ESAB, *Consumíveis para soldagem, arames tubulares, aços de baixa liga, OK TUBROD 110 MC*, ESAB, 2014. (Consultado en Diciembre de 2014). Disponible en:<http://www.esab.com.br/br/pt/products/index.cfm?fuseaction=home.product&productCode=0031135&tab=2>
- Madhusudhan, G., Mohandas, T., Papukutty, K., *Effect of welding process on the ballistic performance of high-strength low-alloy steel weldments.*, Journal of Materials Processing Technology, Vol. 74, No. 1-3, 1998, pp. 27–35.
- Mazuera, D., Suárez, J., Giraldo, J., *Desarrollo de un Procedimiento de Soldadura para juntas de acero de blindaje MIL A 46100 con Proceso GMAW.*, Dyna, Año 78, No. 168, 2011, pp. 65-71.
- Oficina Nacional de Normalización, ONN. NC-ISO 13916 Soldadura - Guía para la medida de las temperaturas de precalentamiento entre pasadas y de mantenimiento del precalentamiento, 2004, pp. 1-7.
- Sorokin, V., Guervaciev, M., Palieva, V., Guervacieva, I., Palieva, S., *Aceros y Aleaciones: Marcador*. Ed. Intermet Engineering, 2001, pp. 1-608.