

Fabricación de moldes y troqueles a partir de las transformaciones del acero AISI 4340

Maroldis Antonio Mosqueda Castaño

mmosqueda@mecanica.ismm.edu.cu

Especialidad: Ingeniería Mecánica

Universidad de Moa (Cuba).

Resumen: Se establecieron las transformaciones microestructurales en la soldadura de un acero empleado para fabricar moldes y troqueles, donde se analizó la costura en la sección longitudinal y transversal del acero AISI 4340 soldado por proceso de soldadura manual por arco eléctrico con electrodos E 316-12, el UTP 65 y el E 7018, de diámetro de 3,2 mm, con preparación de junta en filete simple V a 60°. Se estableció el ciclo térmico de soldadura, donde para una energía entrante de 560 000 W, provoca transformaciones de fase en el acero AISI 4340. Se empleó el diagrama de schaeffler para determinar la composición química resultante del cordón, donde para el electrodo UTP 65 se obtuvo un 45 % aproximado de ferrita y para el electrodo E 312-16 un aproximado de 83 % de ferrita. En el análisis microestructural se determinó que para el electrodo E 312-16 las fases presentes son la martensita y la ferrita δ ; para el UTP 65 se obtuvo la ferrita δ en una matriz austenítica y con el E 7018 existe la martensita y austenita retenida. El análisis de la dureza arrojó que esta disminuye desde HV 494,42 en el electrodo E 312-16 hasta HV 300,12 con el electrodo UTP 65.

Palabras clave: electrodo revestido; acero AISI; cordón de soldadura; microestructura; martensita; austenita; ferrita δ .

Trabajo tutorado por el Dr. Tomás Fernández Columbié.
Recibido: 15 agosto 2018/ Aceptado: 30 marzo 2019.

Molds and dies manufacturing from AISI 4340 transformations steel

Abstract: Microstructural transformations were established in the welding of a steel used to manufacture molds and dies, where the seam in the longitudinal and transversal section of the AISI 4340 steel welded by manual welding process by electric arc with electrodes E 316-12, the UTP 65 and the E 7018, with a diameter of 3.2 mm, with joint preparation in single fillet V at 60° was analyzed. The thermal welding cycle was established where an incoming energy of 560 000 W causes phase transformations in the AISI 4340 steel. The Schaeffler diagram was used to determine the resulting chemical composition of the cord, where for the UTP 65 electrode it was obtained at about 45% of ferrite and for electrode E 312-16 near 83% of ferrite. It was determined in the microstructural analysis that martensite and ferrite δ are the present phases for electrode E 312-16; ferrite δ was obtained in an austenitic matrix for UTP 65, and there is retained austenite and martensite with E 7018. The analysis of hardness showed that it decreases from HV 494.42 in the electrode E 312-16 to HV 300.12 with the UTP 65 electrode.

Keywords: coated electrode; AISI steel; bead; microstructure; martensite; austenite; ferrite δ .

Introducción

Los aceros para herramientas presentan características metalúrgicas que son necesarias a tener en cuenta a la hora de establecer un procedimiento para su soldadura (Caballero, 2008). Los aspectos desconocidos en cuanto a las características de la pieza a recuperar y las restricciones que impone el usuario son dos aspectos frecuentes a encontrarse (Kenchi y Jayadeva, 2015).

En aplicaciones como el conformado en frío estático, donde las herramientas están sometidas a diversas cargas, se usan materiales como aceros aleados. En estos aceros se presenta una variación microestructural como consecuencia de los ciclos térmicos, que debe ser controlada para garantizar su desempeño. Los cambios que ocurren en la zona fundida (ZF) y en la zona de influencia térmica (ZIT) definen la calidad de las uniones soldadas, la funcionalidad de la pieza, el ahorro de recursos a la economía y la disminución de la cantidad de desechos al medio ambiente.

Es por ello que se propone determinar las transformaciones en la sección transversal y longitudinal del cordón de soldadura del acero martensítico AISI 4340 empleado en la fabricación de moldes y troqueles luego de aplicado el ciclo térmico.

Materiales y métodos

El acero AISI 4340 se considera de grado maquinaria al cromo-níquel-molibdeno de la más alta tenacidad por su alto contenido de níquel. El carbono y el cromo, al ser elementos alfégenos, provocan la precipitación de carburos de cromo en la zona afectada por el calor (ZAC) y pueden causar el efecto del agrietamiento en la unión soldada. La composición química estándar de esta aleación se refleja en la Tabla 1.

Tabla 1. Composición química del acero AISI 4340, en porcentaje

C	Mn	Ni	Cr	Mo	Si	S máx.	P máx.	Fe
0,30-0,43	0,5-0,8	1,3-2,00	0,71-70	0,15-0,3	0,20-0,35	0,04	0,04	Balance

En la Tabla 2 se muestran los parámetros de soldadura empleados para la soldadura del acero AISI 4340 mediante el proceso de soldadura SMAW.

Tabla 2. Parámetros para el proceso de soldadura

Diámetro del electrodo (mm)	3,2
Temperatura de fusión (°C)	1 420
Temperatura de ignición (°C)	34
Rendimiento (%)	0,75
Conductividad térmica (W/m·°C)	36

Luego del proceso de soldadura, las muestras fueron cortadas de forma transversal del molde. Se realizó el análisis microestructural en la sección longitudinal y transversal. Para determinar el área de la sección transversal se empleó la ecuación 1.

$$A_{st} = \frac{1}{2}(S)^2 \quad (1)$$

Donde: A_{st} - Área de la sección transversal del cordón, cm^2

S - Tamaño del chaflán, del cordón o de la soldadura de bisel, cm.

Características de los materiales de aporte

El electrodo UTP 65 es un electrodo especial austenítico ferrítico de excelente soldabilidad y alta resistencia mecánica. Posee alta resistencia a la fisuración al soldar metales bases.

El electrodo E 7018 se clasifica en INFRA 718, básico de bajo hidrógeno. Es un nuevo electrodo bajo hidrógeno con polvo de hierro en su revestimiento para soldar en todas posiciones.

El electrodo E 312-16 suelda en todas posiciones, excepto vertical descendente. Genera un arco suave de fácil encendido y reencendido con escasas salpicaduras, deposita un cordón de soldadura con contornos suaves de superficie lisa.

Caracterización de los equipos empleados en la experimentación

Se empleó un microscopio óptico binocular marca NOVEL modelo NIM-100, dotado de una cámara instalada mediante el hardware IMI.VIDEOCAPTURE.exe que refleja la fotografía en el computador. Se realizó la observación de la microestructura de la probeta patrón, la cual se emplea para la comparación de las micrografías obtenidas luego del proceso de soldadura con los diferentes electrodos y en las diferentes zonas.

Pulido de las muestras metalográficas

Se empleó una pulidora metalográfica marca MONTASUPAL de 250 V; 2,5 A; 3,7 kW y 300-1 000 rev/min. La eliminación de los residuos de partículas, grasas y suciedades de la superficie se realizó con agua.

Realización del ensayo de dureza

Se utilizó un microscopio modelo: PMT-3 No 168. El número de dureza HV se determinó por el tamaño de las huellas. Se empleó el procedimiento de dureza Vickers (Callister, 2000). En la Tabla 3 se muestran los parámetros para la medición de la dureza.

Tabla 3. Parámetros para la medición de la microdureza

Condiciones de soldeo	Corriente (I)	Voltaje (U)	Velocidad (m/s)	Calor aporte (kJ/cm)	Dureza (HV)
E 312-16	I ₃₁₂₋₁₆	U ₃₁₂₋₁₆	V ₃₁₂₋₁₆	CA ₃₁₂₋₁₆	HV ₁
UTP 65	I _{UTP 65}	U _{UTP 65}	V _{UTP 65}	CA _{UTP 65}	HV ₂
E 7018	I ₇₀₁₈	U ₇₀₁₈	V ₇₀₁₈	CA ₇₀₁₈	HV ₃

Para determinar la microdureza (HVN) de las probetas de análisis se realizó el ensayo para una carga de 20 g, donde se midieron los diámetros de la huella de la punta de diamante con 136°, con una penetración en un tiempo de 15 s.

Máquina empleada para la soldadura

La máquina soldadora produce corriente alterna. La regulación de los parámetros se realizó modificando la velocidad de soldadura, actuando para ello sobre la corriente y la tensión de arco. Se soldó con corriente directa electrodo positivo. Los rangos de amperaje no sobrepasan los 180 A. El arco que se produce es inestable y suele alcanzar un rendimiento de 85 % a 90 %. La característica de la fuente de esta máquina nos permite saber las relaciones voltaje-intensidad en cada momento de utilización de esta y de hecho se convierte en la característica del arco.

Determinación del depósito con el diagrama de Schaeffler

Los elementos más característicos de los aceros inoxidable son el cromo, el molibdeno, el nitrógeno y el níquel; elementos alfégenos y gammágenos. En los aceros inoxidable austeníticos el Ni equivalente es superior a 8, mientras que Cr equivalente es superior a 18. El material aportado puede presentar estructuras: austenítica, con

pequeñas cantidades de martensita, austenítico-ferrítica, con algún contenido de martensita y austenítico-ferrítica. La ecuación 4 se emplea para determinar el Ni en el acero al carbono, ya que se considera un 15 por el fenómeno de la descarburación.

$$[Ni] = \% Ni + 30 \cdot \% C + 0,5 \cdot \% Mn \quad (2)$$

$$[Cr] = \% Cr + \% Mo + 1,5 \cdot \% Si + 0,5 \cdot \% Nb \quad (3)$$

$$[Ni] = \% Ni + 15 \cdot \% C + 0,5 \cdot \% Mn \quad (4)$$

Cálculo del ciclo térmico de soldadura

El régimen de soldadura depende del tipo de material base, de alambre, fundente y el tipo de unión. Este proceso ocurre en tiempos cortos y con una variación de temperaturas extremas que van desde la fusión hasta aquellas que no afectan la estructura del metal base. El flujo de calor en la dirección del trabajo es pequeño comparado con el de la dirección perpendicular de avance.

Velocidad de soldadura

La velocidad se determinó según la ecuación de Rowe y Jefeus (2008).

$$V_s = \frac{\alpha_d \cdot I_s}{F \cdot \rho} \quad (5)$$

Donde: V_s - velocidad de soldadura; mm/s

α_d - coeficiente de aporte; g/A min ($\approx 10 \% s I$)

F - área de la sección del cordón; cm^2

ρ - densidad del metal fundido; g/cm^3 .

Energía lineal del proceso de soldadura

Para el cálculo de la energía lineal Talero & Muñoz (2000) propuso la ecuación:

$$E_L = 60 \cdot \eta \cdot \frac{U_a \cdot I_s}{V_s} \quad (6)$$

Donde: E_L es la energía lineal; en J/cm

η - eficiencia de la fuente de calor; %.

La eficiencia (η) del proceso de soldadura SMAW oscila entre 0,6 a 0,8. A los efectos de los cálculos realizados se asumió eficiencia de 0,7.

Cálculos numéricos para la soldadura

El cálculo de la longitud del charco de soldadura mostrará el radio efectivo de la distribución del calor y de su influencia en la zona afectada por el calor.

$$L_l = \frac{Q}{2\pi\lambda(T_s - T_0)} \quad (7)$$

Donde: L_l - longitud del charco de soldadura; mm

Q - energía entrante; W

λ - conductividad; W/m K

T_s - temperatura de fusión; °C

T_0 - temperatura inicial; °C.

Al combinar la longitud de la gota de soldadura con la velocidad de recorrido resulta el tiempo t de la fase líquida en un punto de la línea central de la soldadura. Para el cálculo de la energía entrante se emplea la ecuación:

$$Q = q \cdot l \quad (8)$$

Donde: q - energía de calor en Joule por metro lineal de soldadura; J/m

l - longitud a soldar; m.

El calor que se genera en un arco movable o la energía entrante se calculó:

$$q = \frac{I_s \cdot U_a}{V_s} \eta \quad (9)$$

Velocidad de enfriamiento del cordón

Weman (2011) propone determinar la velocidad de enfriamiento del cordón a partir del parámetro adimensional "espesor relativo de la placa" el cual permite establecer cuándo considerar un flujo en dos o tres dimensiones y tipo de placa; su expresión matemática es:

$$\tau = d \sqrt{\frac{\rho C_e (T_c - T_0)}{q}} \quad (10)$$

Donde:

τ - parámetro adimensional de espesor relativo de la placa

d - espesor de la placa; mm

ρ - densidad del material; g/cm³

C_e - calor específico; J/m °C

cT - temperatura de fusión; °C

$0T$ - temperatura inicial; °C.

La velocidad de enfriamiento para una placa fina está dada por:

$$R = \frac{2\pi\lambda(T_c - T_0)^2}{q} \quad (11)$$

El tiempo de enfriamiento del cordón se comprueba por la ecuación 13:

$$t = \eta \frac{I_s^{(1,24+0,0005T_c-0,005v_s)} \cdot U_a^{0,59}}{108 \cdot V_s^{(0,78-0,0005T_c)}} \quad (12)$$

Cálculo de costo del proceso de soldadura

Según Burgos (1987) el tiempo principal de soldadura se determina como:

$$t_o = \frac{\rho(F)L}{kH \cdot I_s} \quad (13)$$

Donde:

t_o - tiempo principal de soldadura; min

ρ - peso específico del material; kg/dm³

F - área de la sección transversal del cordón; cm²

L- longitud a soldar; mm

kH - coeficiente de depósito; (kH ≈ 8,9-9,5)

I_s - intensidad de corriente; A.

El costo de la energía eléctrica se considera parte de los gastos generales. Cuando es necesario comparar procesos competitivos de manufactura o de soldadura se sugiere incluir el costo de la energía eléctrica como costo directo en los cálculos. En ciertas

plantas, a la energía eléctrica se le considera como gasto directo y se carga junto con cada uno de los trabajos.

La cantidad de electrodos necesarios para realizar la unión se determina por:

$$C_E = \frac{S \cdot L_c \cdot \rho}{10^6} \cdot 1,2 \quad (14)$$

Donde:

C_E - cantidad de electrodos; kg

S - área de la sección transversal de la pieza; mm²

10^6 - factor de conversión

2,1 - pérdidas por salpicaduras, calentamiento, aprovechamiento del electrodo.

Preparación de las muestras para el análisis metalográfico

Para conseguir una superficie plana y pulida se realizaron una serie de pasos consecutivos: corte, desbaste, pulido y ataque, que se describen a continuación:

Corte de las muestras para el análisis metalográfico

Se utilizó la sección transversal de la muestra para observar y documentar macroestructuras conjuntas y las microestructuras de una unión soldada.

Fueron realizadas uniones soldadas a tope de uno, dos y tres pases, con preparación de bisel en V, utilizando el proceso SMAW con electrodo E 7018, el electrodo UTP 65 y el electrodo E 312-16. Las muestras utilizadas presentan un tamaño de 15 x 15, para ello se utilizó una fresadora vertical. Los regímenes de corte seleccionados fueron $n = 150$ rev/min y $S = 25$ mm/rev.

Desbaste

Se utilizaron lijas de grano 60, pasando sucesivamente por las de 240, 320, 400, 600, 800 y 1 000. Se empleó pasta GOI en el pulido grueso y de 1 μ m para el segundo pulido y una pulidora manual marca MONTASUPAL.

Ataque

Para atacar los materiales con alto contenido en cromo y níquel se usó reactivo ácido oxálico y nital al 5 %.

Análisis del depósito por el diagrama de Schaeffler

Schaeffler, correlacionando los conceptos de la química y microestructura, trazó un diagrama. Este diagrama tenía como variables a los elementos de aleación para una específica fase microestructural (austenita, ferrita, martensita, o la combinación de estas fases), en el metal soldado. Las coordenadas en el diagrama se muestran como níquel y cromo equivalente, sobre los ejes verticales y horizontales, respectivamente. Esta elección de ejes permitía correlacionar los efectos de los formadores de austenita (Ni, Mn, C) y los formadores de ferrita (Cr, Mo) con relación a la microestructura final.

Se empleó el diagrama para analizar el depósito de los electrodos E 312-16 y del electrodo UTP 65, tal y como se muestra en la Figura 1; no se consideró el electrodo E 7018, ya que tanto el electrodo como el material base su depósito es ferrítico. Se suelda un acero grado maquinaria con tratamiento térmico, según su condición de empleo en moldes y troqueles.

De acuerdo con las ecuaciones 2, 3 y 4, para el electrodo UP 65 el Cr es igual a 21 % y el Ni a 10 %; en el caso del electrodo E 312-16, el Cr es de 31 % y el Ni es de 8 %. Considerando la descarburación que se produce en el acero, el Cr y el Ni para el electrodo E 7018 es de 0,5 y 1,9 %, respectivamente.

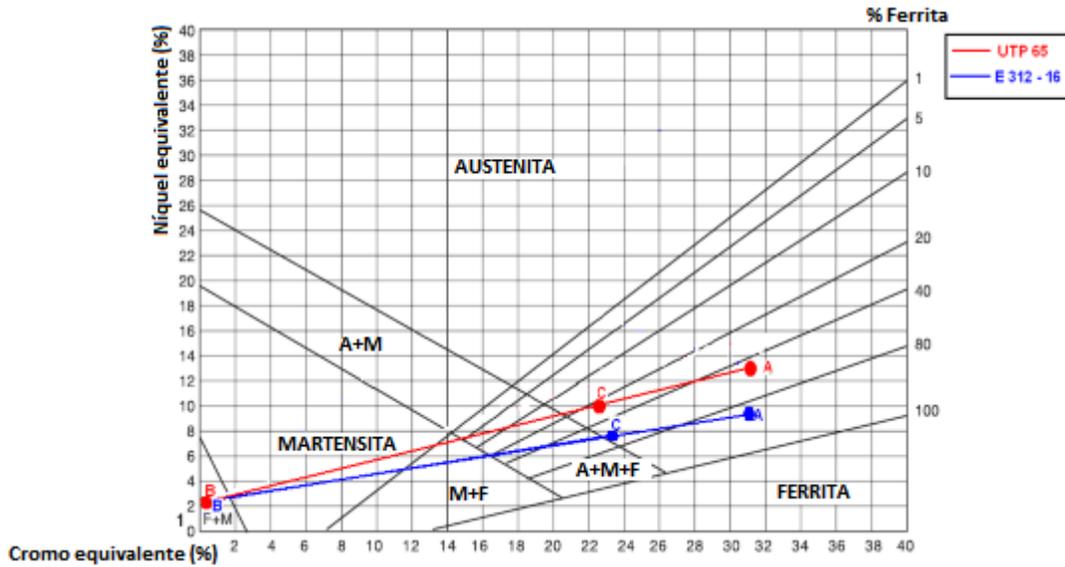


Figura 1. Depósito del electrodo UTP 65 y del electrodo E 312-16.

La línea roja representa el depósito del electrodo UTP 65 y la azul, el electrodo E 312-16. El punto B es común para los dos depósitos y se corresponde con el material base.

Para el electrodo UTP 65 se obtiene de un 10 % a un 15 % aproximado de ferrita y para el electrodo E 312-16, se obtiene de 40 % a 45 % de ferrita, por lo que al realizar la unión soldada se van a obtener estructura generalmente del tipo ferrita, pero se requiere la aplicación de calentamiento para evitar el agrietamiento en frío. También el material aportado puede presentar estructuras: austenítica, con pequeñas cantidades de martensita; austenítico-ferrítica, con algún contenido de martensita y austenítico-ferrítica, lo que coincide con Neesen, De Roy & Smitweld (2008).

En correspondencia con la leyenda del diagrama, la soldadura del acero AISI 4340 con materiales de aporte austenítico se ubica en el campo 2, donde va existir fragilidad por fase sigma entre 500 °C y 900 °C. En este campo, la ferrita se transforma en fase sigma, ocasionando una disminución en la tenacidad, ductilidad y resistencia al creep; dicha disminución es directamente proporcional a la cantidad de ferrita presente.

Análisis de los regímenes de soldadura

La respuesta del área próxima a la línea de fusión en una junta soldada depende de la naturaleza del material soldado y del proceso empleado. Al efectuar el análisis del ciclo térmico de soldadura para la soldadura del acero AISI 4340, independientemente de que durante la soldadura manual por arco eléctrico se emplean electrodos del tipo E

312-16, UTP 65 y E 7018, se considera que los resultados obtenidos son aplicables en todas las condiciones.

El diámetro del electrodo seleccionado fue de 3,2 mm para la soldadura de la unión. La intensidad de la corriente a emplear fue de 150 A.

Se determinó que la tensión necesaria para realizar el proceso de soldadura es de 16 V, siendo esta magnitud permisible dentro de los parámetros de la soldadura SMAW, que es de 5 V a 35 V.

La velocidad de soldadura para realizar el proceso de unión fue de 0,03 mm/s. Para un coeficiente de aporte de 15 g/A·h, el área de la sección transversal del cordón en una junta de esquina, según la ecuación 1 es de 12,5 cm² y una densidad del material de 7,85 g/cm³.

La velocidad de soldadura encontrada, la corriente y el voltaje, en conjunto, controlan el calor aportado por el proceso de soldadura. El propósito de una adecuada selección de la velocidad causará la fusión de los materiales para que al solidificar permitan la formación de una unión integral, según fue reportado por Marulanda, Zapata & Mesa (2007).

La energía lineal del proceso de soldadura se determinó por la ecuación 6; se tuvo en cuenta una tensión del arco de 16 V, la intensidad de la corriente de 150 A, la velocidad de 0,03 mm/s y el rendimiento del proceso de soldadura, que para la soldadura SMAW es de 0,7. El valor obtenido para la energía lineal es de 800 J/cm.

Los efectos más graves, en el material base, serán en las zonas cercanas al cordón, debido a la disipación del calor. Esta zona alcanza temperaturas mayores a la de fusión del propio material y, por lo comentado anteriormente, la estructura del acero dúplex varía proporcionalmente a la zona afectada por el calor.

Análisis de los cálculos numéricos

El cálculo de la longitud del charco de soldadura se determinó por la ecuación 7, la cual tuvo en cuenta una energía entrante, temperatura de fusión de 1 539 °C, temperatura ambiente de 32 °C y conductividad térmica de 57 W/m K. La energía entrante calculada por la ecuación 8 es de 560 000 W. Se consideró una longitud de unión de

0,05 m; luego se sustituyó en la ecuación 9 que tiene presente la intensidad de corriente, la tensión del arco, la velocidad de recorrido y el rendimiento del proceso.

Se determinó el espesor relativo de la placa (ecuación 10) que considera la densidad del material de $7,85 \text{ g/m}^3$, temperatura de fusión de $1\ 539 \text{ }^\circ\text{C}$, temperatura ambiente de $32 \text{ }^\circ\text{C}$; calor específico de 460 J/kg K y energía entrante de $560\ 000 \text{ W}$. El espesor relativo de la placa es de $0,98$; el cual permite establecer que la unión a realizar se considera como espesor de placa gruesa, donde en el caso de una soldadura, el flujo de calor desde la fuente depende del espesor de la placa a soldar.

Los parámetros establecidos para considerar placas gruesas es para mayor de $0,9$. La distinción entre chapa gruesa y fina se refiere al flujo de calor, cuando el flujo es fundamentalmente lateral y por la diferencia de temperaturas entre la superficie y la base que sean pequeñas en comparación con la temperatura de fusión.

Por la ecuación 12 se determinó que el tiempo de enfriamiento del cordón es $10,7 \text{ min}$.

El tiempo de enfriamiento contribuye a la relajación de tensiones y permite atenuar los centros de cristalización que se forman en el retículo cristalino como resultado del gradiente térmico y el grado de subenfriamiento durante el proceso de solidificación.

Análisis de los cálculos de costo de la soldadura

Por la ecuación 13 se calculó el tiempo principal de soldadura, donde se tuvo en cuenta el peso específico del acero AISI 4340; el área de la sección transversal del cordón calculada fue de $12,5 \text{ cm}^2$, la longitud del cordón de soldadura de 5 cm , la intensidad de corriente y el coeficiente de depósito considerado fue de 150 A y de 15 g/Ah , respectivamente, por lo que el tiempo de soldadura fue de 13 min .

La cantidad de electrodos necesarios calculado por la ecuación 14 para un área de la sección transversal de la junta de $12,5 \text{ cm}^2$, la longitud a soldar 5 cm y la densidad del material de aporte de $7,85 \text{ g/cm}^3$, permite establecer que para soldar las muestras seleccionadas se requiere de $0,0017 \text{ kg}$ de electrodos.

Análisis del comportamiento microestructural

Las propiedades y la microestructura de la ZAC dependen de la temperatura y de la velocidad de suministro de calor y de enfriamiento. Se analizan las microestructuras de

la sección longitudinal del cordón de las tres muestras soldadas con diferentes electrodos (Figura 2).

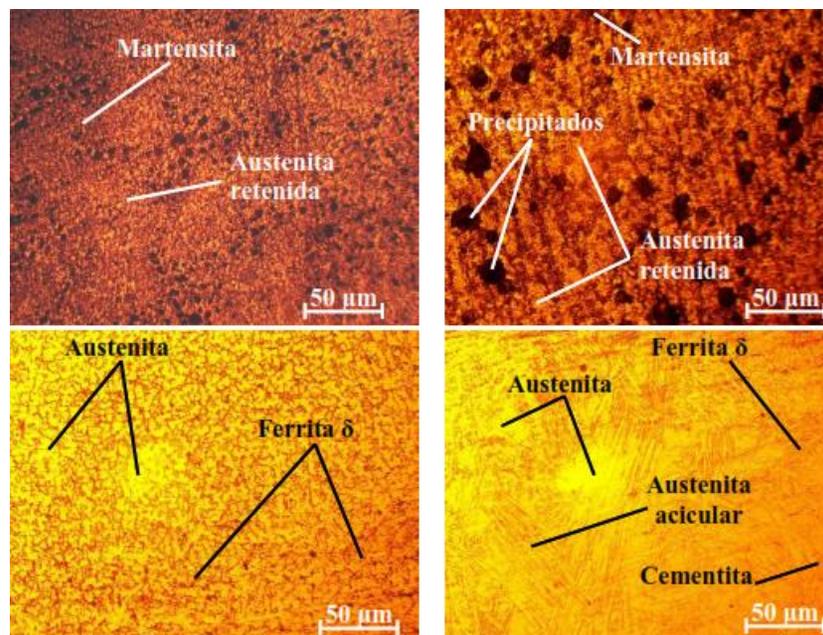


Figura 2. a) Material base. b) Depósito electrodo E 7018. c) Depósito electrodo UTP 65. d) Depósito electrodo E 312-16.

En toda la ZF en la sección longitudinal con el electrodo E 7018 (Figura 2b) se obtuvo martensita intragranular y pequeñas cantidades de martensita intergranular, así como la austenita residual y la presencia de algunos precipitados (posiblemente del elemento manganeso). Esta fase proviene de la transformación de la austenita formada a alta temperatura y su posterior enfriamiento, según el criterio de Lippold y Kotecki (2005).

La microestructura de la ZF en la sección longitudinal del electrodo UP 65 (Figura 2c) es caracterizada por una zona de grano grueso, en la cual el desplazamiento de los límites de grano ferríticos provoca que los granos grandes “consumen” a los granos pequeños por el aporte energético inherente al proceso de soldadura. Esta zona está seguida por una de grano recristalizado, proveniente del proceso de recuperación y nucleación de nuevos granos, además del ascenso y aniquilación de dislocaciones generadas durante el proceso de fabricación del metal base.

En la zona fundida del electrodo E 312-16 se muestra una microestructura compuesta por granos de austenita acicular y con un pequeño aumento de tamaño de grano austenítico en la zona cercana a la raíz de las soldaduras. Se formó ferrita δ en los límites de grano austenítico, condición que se extendió alrededor de los granos

austeníticos desde la línea de fusión hacia el material base. La formación de ferrita δ en los límites de grano restringe el crecimiento de grano austenítico y disminuye la susceptibilidad al agrietamiento en caliente (Bayraktar *et al.*, 2009), sin embargo, la presencia del microconstituyente cementita provoca la formación de una fase dura y frágil y la tendencia al agrietamiento con este tipo de electrodo.

Análisis microestructural del depósito con electrodo E 7018

En la Figura 3 se muestran las microestructuras de la ZF y la ZIT, obtenidas con el electrodo E 7018.

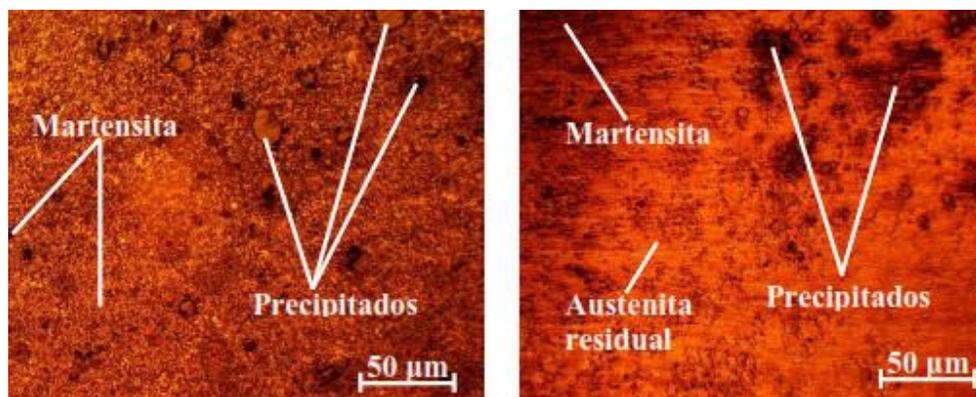


Figura 3. a) Zona fundida E 7018. b) ZIT electrodo E 7018. 50 μm 50 μm .

La Figura 3a correspondiente a la zona de fusión se aprecia una frontera de estructura martensítica que se extiende hacia la ZIT, en esta sección transversal del cordón de soldadura se observa un comportamiento muy similar al obtenido en la sección longitudinal del cordón, lo que puede plantearse que el cordón presenta la misma homogeneidad, tanto en la sección transversal como longitudinal. La estructura martensítica promueve la dureza en esta zona y, a la vez, podría promover el debilitamiento del material en esta zona.

La zona afectada por el calor en la unión soldada muestra transformaciones de fase, parecidas a las encontradas en el paso de raíz, como la martensita, microestructura que se caracteriza por presentar un elevado contenido de carbono debido a las velocidades de enfriamiento a las que se forman.

Se realizó el análisis en la interfase del cordón de soldadura con el electrodo E 7018; en la Figura 4 se muestra el comportamiento obtenido.

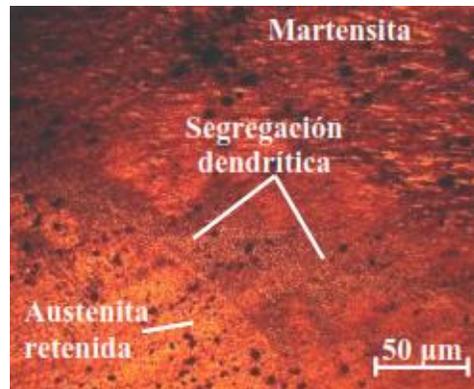


Figura 4. Interfase del cordón, electrodo E 7018.

La microestructura está compuesta por martensita y austenita retenida, observándose un patrón de segregación dendrítico. Debido al aumento de aleación localizado en la zona interdendrítica se produce una disminución de la temperatura de inicio de la transformación martensítica (M_s), lo que explica la presencia de austenita retenida. A raíz de que el depósito fue multipasadas, se produjo un revenido de la martensita con los sucesivos cordones, lo que daría lugar a pequeños precipitados, según Leshchinskiy y Samotugin (2001).

Análisis microestructural del depósito con electrodo E 312-16

La soldadura entre el acero 4340 y el electrodo E 312-16 se considera como una unión disímil. Ambos materiales presentan composición química diferentes (austenítico-ferrítico). En la Figura 5 se observa el comportamiento microestructural obtenido con este material de aporte en la sección transversal.

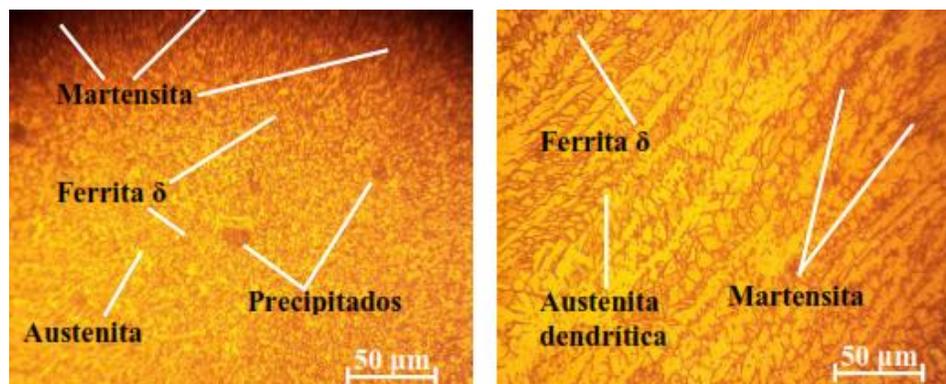


Figura 5. a) Zona fundida E 312-16. b) ZIT electrodo E 312-16.

En la zona fundida (Figura 5a) se observa la presencia de la martensita en la línea próxima al borde del metal base, mientras que en el centro del cordón existe la ferrita δ con una distribución equiaxial de austenita, las cuales se han formado por efecto del ciclo de soldadura impuesto. La ferrita de borde de grano es la primera morfología que se forma durante el enfriamiento, teniendo como ubicación preferencial los bordes de grano de austenita, aunque también puede localizarse dentro de los granos de la austenita, por lo que presenta una estructura bien definida.

En la Figura 5b se percibe que durante el proceso de soldadura la aplicación de temperaturas superiores a 900 °C, en el acero AISI 4340 con el electrodo E 312-16, quien presenta estructura austenítica, no existe la presencia de la fase sigma σ , por lo tanto, el de ferrita δ aumenta, mientras que pequeñas islas de austenita secundaria vuelven a formarse bordeando el grano ferrítico.

En la Figura 6 se muestra el comportamiento microestructural obtenido en la interfase del depósito con el electrodo E 312-16.

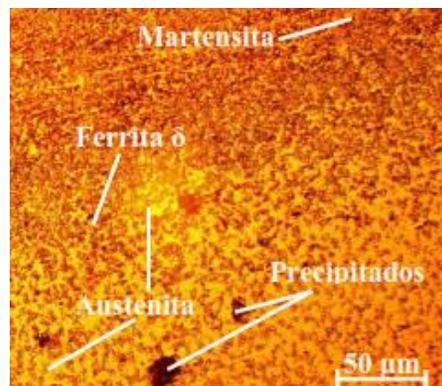


Figura 6. Interfase del cordón, electrodo E 312-16.

Se observa en la interfase una matriz austenítica rodeada de granos de ferrita δ y la formación de la martensita en la línea cercana al material base. La austenita es promovida por el contenido de Ni presente en el material de aporte, el cual, al ser un elemento ganmágeno, engrosa el bucle gamma y da lugar a este microconstituyente; de igual manera el contenido de carbono da origen a la formación de la ferrita δ en áreas cercanas al centro de la zona fundida, así como a la formación de la martensita.

El crecimiento de los cristales se origina con la misma orientación cristalina que los granos de metal base parcialmente fundidos. Este fenómeno recibe el nombre de crecimiento epitaxial. Durante el crecimiento de estos granos iniciados epitaxialmente

se produce una selección de unos a expensas de otros, formándose una textura de crecimiento.

Análisis microestructural del depósito con electrodo UTP 65

Se realizó el análisis microestructural del depósito con electrodo UTP 65; se procedió a analizar este comportamiento en la sección transversal del cordón. En la Figura 7 se muestran las transformaciones de fases obtenidas.

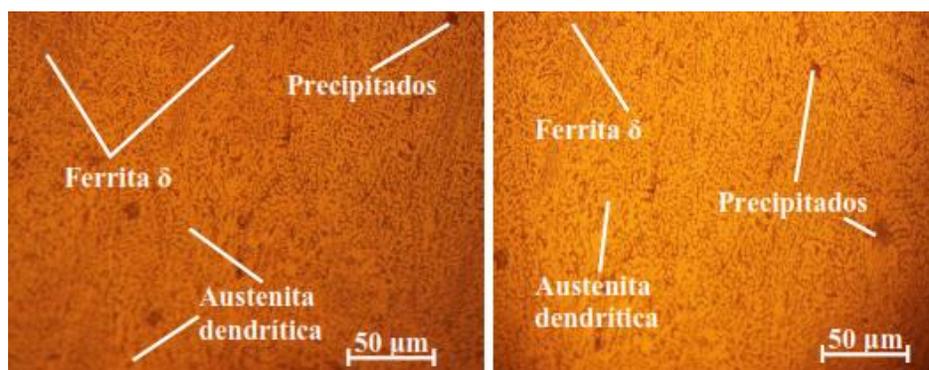


Figura 7. a) Zona fundida UTP 65. b) ZIT electrodo UTP 65.

Para el depósito con el electrodo UTP 65 se ha obtenido la formación de la ferrita delta en una matriz austenítica, es decir, una solidificación del tipo ferrita-austenita, o sea, posee ferrita eutéctica en una matriz austenítica. En la zona fundida se puede observar mayor cantidad de precipitados dentro de la matriz ferrítica y en la frontera de fusión.

Por otro lado, se mantiene un mayor balance de fases ferrita/austenita, el cual resulta de su elevado porcentaje de Cr y Mo como formadores de ferrita y el Ni como estabilizador de la austenita, lo cual ayuda a mantener las propiedades mecánicas y de resistencia a la corrosión, ya que es importante mantener el equilibrio de ambas fases. El modo de solidificación FA (ferrítico-austenítico) es esencial para reducir el riesgo al agrietamiento más que el contenido residual de ferrita después de la soldadura, según lo reportado por Xiaoqiang (2009).

El rango de temperaturas durante la solidificación de ferrita primaria es menor que el de austenita primaria. Esto provee un pequeño rango crítico de temperaturas para la formación de fisuras. La presencia de ferrita refina el tamaño del grano del metal solidificado, permitiendo mejores propiedades mecánicas y mayor resistencia a la fisuración. Los altos coeficientes de difusión para impurezas en la ferrita, en comparación con la austenita, permiten una mayor homogenización en la ferrita y

menor tendencia a la fisuración, así como la contracción de volumen asociada con la transformación ferrita/austenita reduce los esfuerzos de tensión cerca de la fisura, disminuyendo la tendencia al agrietamiento; criterios expuestos por Xiaoqiang (2009).

El análisis microestructural de la interfase obtenida con el electrodo UTP 65 se muestra en la Figura 8. El análisis se realizó en el último cordón de soldadura.

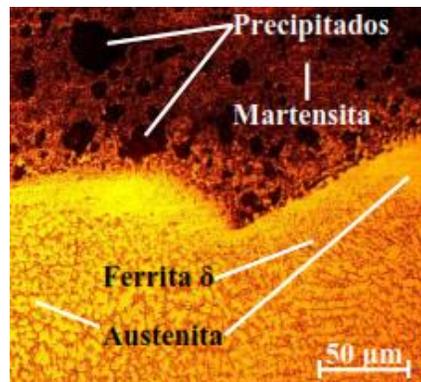


Figura 8. Interfase del depósito con electrodo UTP 65.

En la zona del cordón de soldadura con el depósito con el electrodo UTP 65 que, debido al gradiente de temperatura impuesto por el ciclo térmico, en la línea de fusión entre el MB y el cordón de soldadura, existe la presencia de la austenita con la formación de la martensita. Esta martensita se obtuvo en la zona de crecimiento de grano.

En esta zona se afecta térmicamente el material debido al calor de aporte generado por el proceso, además de que la soldadura multipasadas realiza un efecto de tratamiento térmico sobre el cordón anterior, por lo que disminuye la dureza de la ZAT en la zona del cordón. Se puede observar la formación de martensita en la zona de crecimiento de grano, lo cual es indicativo de que la disminución de la velocidad de enfriamiento no fue la suficiente como para impedir la formación de este microconstituyente; por otra parte, la presencia de carbono y cromo como elementos alógenos propician su formación.

El crecimiento de los cristales se da con la misma orientación cristalina que los granos de metal base parcialmente fundidos. Este fenómeno recibe el nombre de crecimiento epitaxial, mecanismo común a todos los procesos de soldadura por fusión, que posibilita la coalescencia buscada para tener continuidad entre el metal base y el metal de soldadura. Durante el crecimiento de estos granos iniciados epitaxialmente se

produce una selección de unos a expensas de otros, formándose una textura de crecimiento.

Según los resultados obtenidos de las microestructuras, el electrodo que presenta mejor continuidad metalúrgica en la soldadura de los moldes y troqueles es el UTP 65, precedido del E 7018 (tratado térmicamente) y, por último, el E 312-16.

Determinación de los perfiles de microdureza

Se realizaron las mediciones de los perfiles de microdureza en las diferentes zonas analizadas microestructuralmente (ZF, ZIT y la interfase), tal como se muestra en la Figura 9.

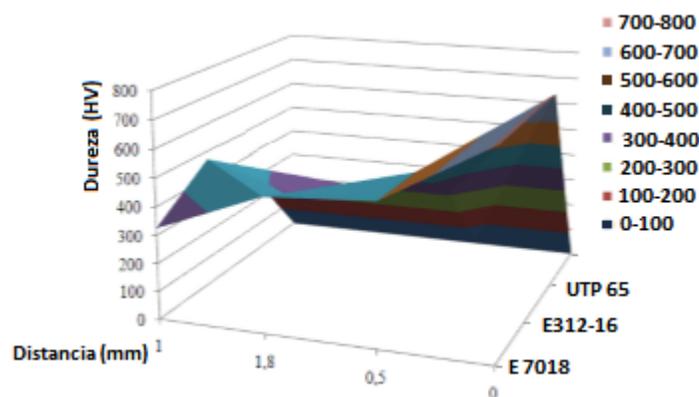


Figura 9. Comportamiento de la dureza para los diferentes electrodos.

Según los resultados obtenidos existen variaciones en el comportamiento de la microdureza en las diferentes zonas: en el electrodo E 7018, desde una dureza en el material base de HV 717,25 (tratado térmicamente) al llegar a la ZIT esta disminuye hasta HV 498,70 en la interfase, este valor de dureza es de HV 325,37; para un incremento nuevamente de HV 475,32 en la zona fundida, donde el microconstituyente martensita es el que mayor incidencia tiene en esta propiedad mecánica.

Con el electrodo E 312-16, la dureza en la ZIT es de HV 494,42; luego tiene una tendencia a la disminución en la interfase, que se comporta con HV de 470,16 y al llegar a la ZF se logra una dureza HV 355,15. En el depósito, con este electrodo, el microconstituyente que incrementa esta propiedad es la martensita.

Para el electrodo UTP 65 existe variaciones significativas en relación a los depósitos, la dureza alcanzada en la ZIT es de HV 315,12; al pasar por la interfase disminuye hasta

HV 300,12 y vuelve a ser incrementada hasta HV 310,35 al llegar a la zona fundida. La presencia de las estructuras como la austenita y la ferrita δ formadas durante la aplicación del ciclo térmico propicia que la dureza no sea elevada.

Los valores de dureza obtenidos determinan que el mejor resultado lo presenta el electrodo UTP 65 al encontrarse la dureza en un rango de hasta HV 350, por encima de este valor existe la tendencia al fenómeno de fisuración en la unión soldada.

El mayor valor de dureza está influenciado por la microestructura resultante obtenida, ya que tanto el MB como el material de aporte presenta en su composición elevado contenido de carbono y cromo que favorecen el endurecimiento de esta zona producto al ciclo térmico de soldadura impuesto. Por otro lado, hay que significar que debido al depósito de los cordones presumiblemente haya existido un tratamiento de recocido, el cual introdujera un recocido en la zona de fusión y la dureza tenga una disminución.

Análisis de regresión múltiple para dureza en las diferentes zonas

Se realizó el análisis de la varianza para las variables en las diferentes zonas de la soldadura y la dureza en cada una de ellas en correspondencia con el tiempo de enfriamiento del cordón. En la Tabla 4 se muestran los resultados obtenidos.

Tabla 4. Análisis de regresión múltiple

Variable dependiente: Dureza					
Error estadístico					
Parámetro	Estimación	Estándar	T	P-Valor	
CONSTANTE	-82,0429	219,885	-0,373118	0,0724	
Distancia	56,2054	45,8164	1,22675	0,274	
Análisis de varianza					
Fuente	Suma de cuadrados	GL	Cuadrado medio	Cociente-F	P-Valor
Modelo	2 728,26	2	1364,13	0,75	0,051
Residuo	9055,61	5	1811,12		
Total (Corr.)	11783,9	7			
R-cuadrado=93,1525 porcentaje					
R-cuadrado (ajustado para g.l.) =0,0 porcentaje					
Error estándar de est. =42,5573					
Error absoluto medio=27,2786					
Estadístico de Durbin-Warson=1,68698 (P=0,4884)					
Autocorrelación residual en Lag 1=-0,000289104					

Dado que el p-valor en la tabla ANOVA es menor o igual a 0,10 existe relación estadísticamente significativa entre las variables para un nivel de confianza del 90 % o superior. La ecuación del modelo ajustado es:

$$Distancia = 4,486 - 0,0091 \cdot E 312 - 16 - 0,0020 \cdot E 7018 + 0,0049 \cdot UTP 65$$

Conclusiones

Al establecer las transformaciones microestructurales que se originan en el acero AISI 4340 durante el proceso de soldadura se determina que en las zonas formadas por el ciclo térmico son diferentes para cada uno de los electrodos empleados: para el E 312-16 las fases presentes son la martensita y la ferrita δ , para el UTP 65 se obtiene la ferrita δ en una matriz austenítica y con el E 7018 surge la martensita y austenita retenida, siendo más favorable la del UTP 65.

Se comprueba que el molde a someter a proceso de soldadura, antes del proceso por haber sido tratado térmicamente, presenta una dureza de HV 717,25; lo cual está asociado al microconstituyente martensita, fase dura, por lo que se hace necesario el empleo de electrodos de base níquel como el E 312-16 o el UTP 65 o electrodo de poca penetración como el E 7018.

Existen variaciones en el comportamiento de la microdureza en las diferentes zonas. Con el electrodo E 7018 se obtienen durezas desde HV 498,70 en la ZIT hasta HV 475,32 en la zona fundida; el E 312-16, en la ZIT es de HV 494,42 hasta HV 355,15 en la zona fundida y con el UTP 65, desde HV 315,12 en la ZIT hasta HV 310,35 en la zona fundida, dureza menor de HV 350, que garantiza la mejor continuidad metalúrgica.

Al establecer la composición química resultante por el diagrama de Schaeffler se determina que con el electrodo UTP 65 se obtiene entre un 12 % y 15 % de ferrita y para el electrodo E 312-16, se obtiene entre un 40 % y 45 % de ferrita; no se considera el E 7018 porque este electrodo no se ajusta al análisis por este diagrama.

Referencias bibliográficas

- BAYRAKTAR, E.; CHEVALIER, J.; KAPLAN, D. & DEVILLERS, L. 2009. Physical understanding of ferrite grain growth during welding in interstitial free steels (IFS) +. *Arabian Journal for Science and Engineering* 34(1C): 115-127
- BURGOS, J. 1987. *Tecnología de Soldadura*. Pueblo y Educación, La Habana.
- CABALLERO, R. 2008. *Comportamiento mecánico bajo sollicitaciones de contacto de materiales de herramienta recubiertos con capas cerámicas duras*. Trabajo de

diploma. Universidad Politécnica de Cataluña. Disponible en: <http://hdl.handle.net/2099.1/5508>.

CALLISTER, W. 2000. *Materials Science and Engineering. An Introduction*. Fifth Edition. John Wiley & Sons, Inc. 8195 p.

KENCHI, K. & JAYADEVA, C. 2015. Microstructure and abrasive wear behaviour of shielded metal arc welding hardfacing used in agricultural implements. *International Journal on Recent and Innovation Trends in Computing and Communication* 3(1): 193-202.

LESHCHINSKIY, L. & SAMOTUGIN, S. 2001. Mechanical properties of plasma-hardened 5% chromium tool steel deposited by arc welding. *Welding Research* 80(1): 25-30.

LIPPOLD, J. & KOTECKI, D. 2005. *Welding metallurgy and weldability of stainless steels*. Wiley-VCH, USA. ISBN 0-471-47379-0.

MARULANDA, J.; ZAPATA, A. & MESA, D. 2007. *Fundamentos de la soldadura de metales*. Universidad Tecnológica de Pereira.

NEESEN, F.; DE ROY, C. & SMITWELD, L. 2008. Soldadura de alta productividad en la construcción naval. *Soldadura y tecnologías de unión* 19(110): 30-33.

ROWE, R. & JEFFEUS, L. 2008. *Manual de Soldadura GMAW (MIG-MAG)*. Paraninfo Ediciones, España.

TALERO, J. & MUÑOZ, M. 2000. *Introducción al cálculo de estructuras metálicas según Eurocódigo 3*. Ediciones Bajo Cero, España.

WEMAN, K. 2011. *Welding processes handbook*. 2nd Edition. Woodhead Publishing. 280 p. ISBN: 9780857095107.

XIAOQIANG, H. 2009. Effects of delta-ferrite on the microstructure and mechanical properties in a tungsten-alloyed 10%Cr ultra-supercritical steel. *Acta Metallurgica Sinica* 45(5): 553-558.