

Influencia de la temperatura de carburización en la tenacidad a la fractura en el acero AISI 3215

Ismael I. Purizaga Fernández¹, Arístides Távara Aponte², Richard L. Purizaga Haro³, Jimmy I. Purizaga Haro⁴.

¹Docente Asociado de la Universidad Nacional de Trujillo, ipurifer@hotmail.com

²Docente Principal de la Universidad Nacional de Trujillo, aristidestavara@hotmail.com

³richard3067@hotmail.com

⁴jiph147@hotmail.com

Recibido: 06-02-2015

Aceptado: 14-04-2015

RESUMEN

En este trabajo se ha estudiado la influencia de la temperatura de carburización sobre la tenacidad a la fractura en deformación plana (K_{Ic}) en el acero AISI 3215. Se utilizaron probetas de tensión en compacto para el ensayo de tenacidad a la fractura según la norma ASTM E399-90. El tratamiento termoquímico de carburización se realizó utilizando como medio difusor 80% carbón vegetal y 20% carbonato de bario a las temperaturas de carburización de 850, 900, 950 y 1000°C, con un tiempo de permanencia de 3 horas, posteriormente templadas en agua y revenidas a 180°C por 1 hora. El acero AISI 3215 microestructuralmente tiene ferrita y perlita, luego de la carburización la microestructura observada de la capa para todas las condiciones de temperatura está constituida por martensita y cementita en la superficie, y de martensita, ferrita y bainita en el núcleo. Los resultados indican que la dureza superficial, el espesor de capa, resistencia a la tracción y tensión de fluencia aumentan, y la tenacidad a la fractura (K_{Ic}) disminuye al incrementar la temperatura de carburización. Además el registro de la carga aplicada frente al desplazamiento para la temperatura de carburización de 850°C es de tipo I, mientras que para las temperaturas de 900, 950 y 1000°C es de tipo III.

Palabras claves: carburización, tenacidad a la fractura, dureza, espesor de capa, acero AISI 3215.

ABSTRACT

In this research has studied the influence of carburizing temperature on fracture toughness in plane strain (K_{Ic}) in AISI 3215 steel. Were used compact tension specimens in testing fracture toughness according to standard ASTM E-399. Thermochemical carburization treatment is made using 80% charcoal and 20% of barium carbonate at carburizing temperature of 850, 900, 950 and 1000 ° C, with a residence time of 3 hours, then hardening in water and tempered at 180 ° C for 1 hour. The s AISI 3215 steel having ferrite and pearlite microstructurally, after carburization the coating microstructure observed for all temperature conditions consists of martensite and cementite in the surface, and martensite, ferrite and bainite in the core. The results showed the surface hardness, the layer thickness, tensile strength and yield strength increase, and fracture toughness (K_{Ic}) decreased with increasing carburising temperature. Also registration load applied against displacement for the carburizing temperature of 850 ° C is of type I, while for temperatures of 900, 950 and 1000 ° C is of type III.

Keywords: carburizing, fracture toughness, hardness, layer thickness, AISI 3215 steel.

I. INTRODUCCIÓN

La fractura es un fenómeno que ha recibido atención constante desde que se comenzaron a utilizar a gran escala máquinas y estructuras cuya función principal es la de resistir y transmitir una carga o presión. En particular el uso de componentes metálicos como: automóviles, puentes, edificios,

aviones, barcos, etc. Siempre ha ido acompañado del riesgo de fractura. La fractura de estas estructuras frecuentemente va acompañada de pérdidas materiales, económicas y humanas. Muchas fallas pueden ocurrir una sola vez en toda su vida y pueden significar una gran catástrofe como en el caso de los accidentes aeronáuticos, reactores nucleares y automotrices. Estas fallas con frecuencia producen pérdidas por la demora de la producción, daños al ambiente y el deterioro ante la opinión pública de la imagen de la empresa. En resumen, se puede decir que la fractura ha significado un freno al desarrollo tecnológico de industrias enteras (González, 2004: 13).

Anteriormente en el diseño de una estructura o pieza mecánica sólo se tomaba en cuenta la tensión de fluencia del material (σ_{ys}) como la única propiedad del material para el análisis de esfuerzos, debido a que se consideraban que éstos eran totalmente homogéneos, sin embargo esta concepción ha cambiado, ya que en la actualidad se sabe que todos los materiales presentan defectos propios de su proceso de manufactura, como son por ejemplo: vacancias, inclusiones no metálicas, dislocaciones, poros y fisuras, siendo estas últimas los defectos más críticos, ya que estos actúan como concentradores de tensiones, los cuales pueden llegar a propagarse debido a esfuerzos cíclicos (fatiga), sobrecargas o algún choque térmico. Debido a ello la presencia de una fisura o grieta en una estructura es algo crítico ya que esta puede ocasionar una fractura catastrófica inesperada bajo condiciones de tracción normal del material (González, 2004: 14-15).

Debido a ello la metodología del diseño ha cambiado actualmente, porque se ha comprendido que los defectos que poseen los materiales y estructuras influyen en sus propiedades mecánicas, por lo tanto su vida útil. Debido a esto se debe saber tomar en cuenta la presencia de estos defectos en el diseño, y así poder reducir al mínimo los coeficientes de seguridad y el riesgo de falla catastrófica. Es por ello que surgió la necesidad de contar con otro parámetro de diseño adicional a la tensión de fluencia que considere estos defectos del material que es la tenacidad a la fractura (Shukla, 2005: 2-10).

Existen muchos métodos para prevenir este tipo de fallas, uno de los tratamientos termoquímicos para prevenir este tipo de fallas es la carburización. La carburización es un procedimiento de saturación de carbono en la superficie del acero, mediante un medio carburante que suministra carbón atómico a la superficie del acero, para que este sea absorbido y difundido hacia su interior intersticialmente a una temperatura austenítica (Hoffman N. y Vogel V., 1998: 13-19). El objetivo de la carburización es proporcionar un endurecimiento superficial del acero, mediante la modificación parcial de su composición química en las secciones que se desea endurecer, seguido de un tratamiento térmico adecuado (temple y revenido). Mediante este tratamiento térmico se obtiene una alteración microestructural en la zona endurecida en la superficie, al mismo tiempo el núcleo del material permanece dúctil y tenaz (Martínez y Palacios, 2008: 113-128).

El acero AISI 3215 es un acero de bajo carbono hipoeutectoide que microestructuralmente consta de ferrita y perlita, además tiene pequeñas cantidades de Cr, Ni y Mo y es el que se ha utilizado en el presente trabajo. Es un acero que tiene mucha aplicación en la región, en empresas metalmeccánicas y agroindustrias, se usa en partes de maquinarias, piñones, ejes de caja de cambios, ejes de levas, pines, entre otros. Para este acero el proceso de carburización es relevante, debido al cambio microestructural en la capa de difusión haciendo que sea resistente al crecimiento de grieta en la superficie de la pieza, alargando la vida de uso de las piezas fabricadas con este acero (BOHLER, 2007:18-20).

Mangonon (2001), considera que el mecanismo de difusión del carbono hacia el interior del acero es intersticial y que son controlados por la temperatura y el tiempo del proceso. El exceso de oxígeno produce descarburización en la superficie del acero, acelerando el crecimiento de grieta, disminuyendo la tenacidad a la fractura.

Shen Chin Lee y colaboradores (1987), evaluaron el efecto del endurecimiento superficial en la tenacidad a la fractura del acero AISI 8620 cementado a 930°C durante diferentes periodos de tiempo, templado en agua y posteriormente revenido a diferentes temperaturas durante una hora. El estudio permitió concluir que los valores de tenacidad a la fractura (K_{IC}) se mejora con el aumento del tiempo de carburización debido al incremento de la profundidad de la capa, la estructura martensita/martensita revenida fue el componente que más contribuye a la mejora de la dureza, pero la austenita retenida así como el tamaño de grano grueso, tiene efectos adversos sobre la tenacidad a

la fractura del acero carburizado. La temperatura de revenido de 500°C provee los valores máximos de K_{IC} y a temperaturas más altas de revenido reducen los valores de la tenacidad a la fractura.

Cori (2007), estudió la influencia del recubrimiento por cementación sólida del acero SAE 1022 sobre el comportamiento al desgaste y la fatiga por flexión rotativa en ménsula, determinó que la temperatura y el tiempo de cementación son las variables influyentes, las cuales influyen posteriormente en la dureza, el tamaño de grano y el espesor de la capa cementada. Experimentalmente mostró que la cementación sólida depositada en la superficie del acero SAE 1022 aumenta la resistencia al desgaste y la resistencia a la fractura por fatiga.

Távora (2006), en su investigación del tiempo de revenido sobre la tenacidad a la fractura en deformación plana K_{IC} en el acero AISI 1045 concluye que a medida que se aumenta el tiempo de revenido en el rango de 15 a 45 minutos a la temperatura de 300°C, la tenacidad a la fractura (K_{IC}) aumenta.

El factor K_{IC} es una propiedad del material llamado tenacidad a la fractura, es independiente de la geometría por lo que su determinación experimental implica la fabricación de probetas de dimensiones tales que se garantice un estado de deformación plana. De esta manera se puede lograr que el K_{IC} calculado a partir del ensayo de una probeta de laboratorio, pueda ser aplicado a una estructura o elemento construido del mismo material. El K_{IC} como medida de la tenacidad a la fractura de los materiales con comportamiento lineal elástico, caracteriza la magnitud de las tensiones en el extremo de una grieta aguda o defecto y está definida como la resistencia del material a la propagación inestable de grieta (Navara y Bengts, 1984: 33-43). Este parámetro debe de evaluarse de acuerdo a la norma ASTM E399-90, garantizando un estado de deformación plana por delante de la punta de la grieta, lo cual produce una zona plástica pequeña y por lo tanto cumple la condición de la mecánica a fractura lineal elástica (MFLE). La norma propone varios tipos de probetas entre las cuales la más utilizada es la tensión compacta (TC).

Con el objeto de generar una grieta aguda, se somete la probeta a fatiga (esfuerzo cíclicos) y, una vez prefisurada o preagrietada se realiza el ensayo de tracción, registrándose la carga (P) en función de la abertura de la grieta, medida mediante un clip gage en la boca de la entalla (crack opening displacement, COD). La grieta por fatiga representa un defecto muy pronunciado, debido a sus dimensiones pequeñísimas. El radio de la raíz de una grieta de fatiga es muy pequeño que elimina la deformación en la raíz de la grieta y los esfuerzos que se pueden inducir en ella haciendo una muesca maquinando. Se debe de asignar también un frente de grieta recto (Thornton y Colangelo, 1987: 276-300).

Para garantizar la deformación plana tanto la longitud de grieta a , el ligamento ($w - a$) y el espesor de probeta (B) deben cumplir la siguiente condición:

$$a, w - c, B \geq 2.5 \left(\frac{K_C}{\sigma_{ys}} \right)^2 \quad (1)$$

La tenacidad a la fractura es la propiedad del material que combinada con la tensión de diseño y el tamaño de grieta existente en el componente, controla su comportamiento a fractura. La fractura ocurre cuando K_I alcanza un valor crítico (K_{IC}) y está dado por:

$$K_I = K_{IC} = \sigma(\pi a)^{1/2}. y \quad (2)$$

Según esto se puede predecir el esfuerzo de fractura (σ) de un material que contiene una grieta de tamaño conocido. O por el contrario, para un nivel dado de esfuerzos de un material específico es posible determinar la grieta o el defecto más grande que se puede tolerar. Estos conceptos son la base de la aplicación de la mecánica de fractura a los problemas de diseño de los materiales de ingeniería y hace que sea una herramienta de diseño tan importante (Bris J., et al, 2005:30-34).

En el presente estudio se evaluó la temperatura en el proceso termoquímico de carburización sobre la tenacidad a la fractura en deformación plana (K_{IC}) en el acero AISI 3215. El propósito principal de este trabajo fue determinar la influencia de la temperatura de carburización en un rango de 850 a 1000°C sobre la capa de cementación y su microestructura y a la vez sobre la tenacidad a la fractura.

II. MATERIAL Y MÉTODOS

2.1. Material de estudio

El material usado fue el acero AISI 3215, el cual fue suministrado por BOHLER del Perú según su codificación ECN-E230, en forma de barras de 1000 mm de longitud x 55 mm de ancho x 22 mm de espesor. Cuya composición química se presenta en la Tabla 1 y sus propiedades mecánicas en la Tabla 2.

Tabla 1. Composición química del acero AISI 3215 (BOHLER ECN-E230).

Elemento	C	Cr	Ni	Si	Mn
%	0,18	1,50	1,60	0,30	0,48

Tabla 2. Propiedades mecánicas del acero AISI 3215 (BOHLER ECN-E230)

Estado suministro	Resistencia a la tracción (kg/mm ²)	Límite de fluencia (kg/mm ²)	Elongación (%)	Dureza Brinell (HB)
Recocido	65,0	46,0	15,0	218,0

En la Figura 1, se muestra la fotomicrografía del acero AISI 3215 en estado de suministro (recocido)

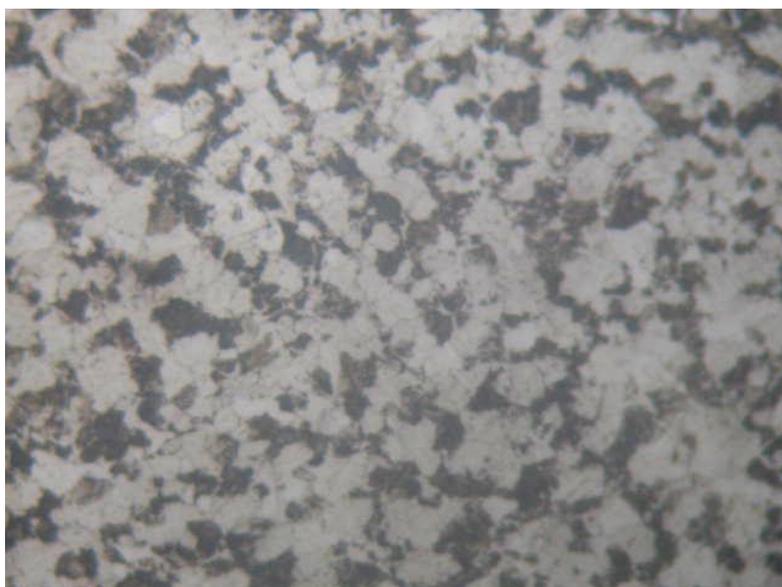


Fig. 1. Fotomicrografía del acero AISI 3215 (recocido). La microestructura consta de ferrita y perlita característica de un acero hipoeutectoide. Ataque químico: Nital 3%. 200X.

2.2. Procedimiento experimental

De la barra de 1000 mm de longitud x 55 mm de ancho x 22 mm de espesor, se prepararon para el ensayo de tenacidad a la fractura (K_{IC}) 12 probetas para tensión en compacto (TC), según norma ASTM E399-90. Con dimensiones y geometría que se indican en las Figuras 2 y 3.

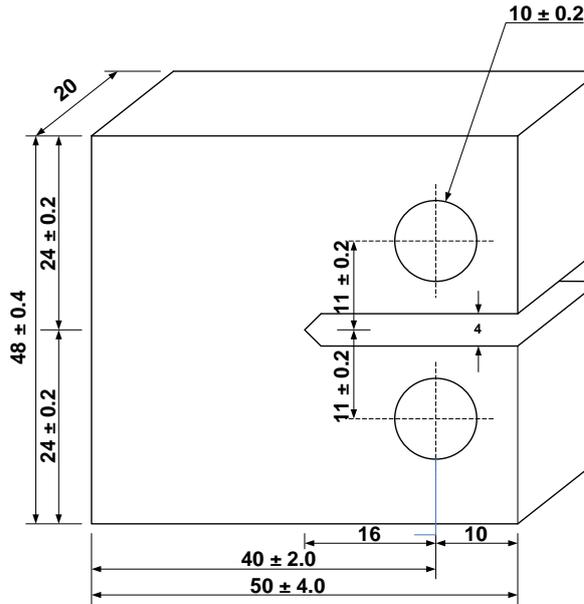


Fig. 2. Dimensiones de la probeta de tensión en compacto (TC) para el ensayo de tenacidad a la fractura (K_{Ic}). Según norma ASTM E399-90.



Fig. 3. Geometría de la probeta para el ensayo de tenacidad a la fractura (K_{Ic}).

Para el ensayo de tracción se utilizaron probetas estandarizadas según la norma ASTM A-370, como se indica en la Figura 4.



Fig. 4. Probetas para el ensayo de tracción según la norma ASTM A-370.

Se usó como medio difusor para el tratamiento térmico de carburización: 80% de carbón vegetal con una granulometría de 3 - 5 mm y 20% de carbonato de bario (activador).

Variable independiente:

- Temperaturas de carburización ($^{\circ}C$): 850 – 900 – 950 – 1000.

Variables dependientes:

- Tenacidad a la fractura (K_{Ic}) : $MPa\sqrt{m}$
- Dureza superficial: HRC.
- Espesor de capa (x): mm.

Tratamiento termoquímico de carburización

Se empaquetaron las probetas dentro de las cajas fabricadas de acero inoxidable, finalmente se selló la tapa con arcilla refractaria para evitar que no circule aire dentro de la caja. Según Figura 5.

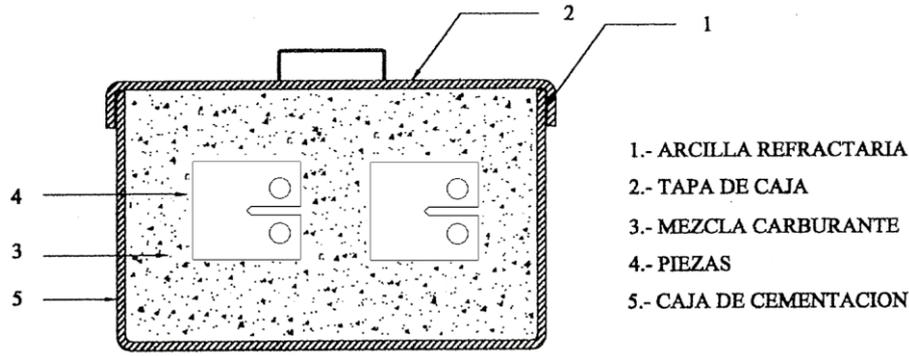


Fig. 5. Empaquetamiento de las probetas en la caja de carburización.

Luego se introdujeron las cajas dentro del horno eléctrico tipo mufla a diferentes temperaturas de carburización: 850, 900, 950 y 1000°C con un tiempo de permanencia de 3 horas. Seguidamente las probetas se retiraron del horno y se templaron directamente en agua (25°C) y el revenido fue a 180°C por 1 hora, como se indica en la Figura 6.

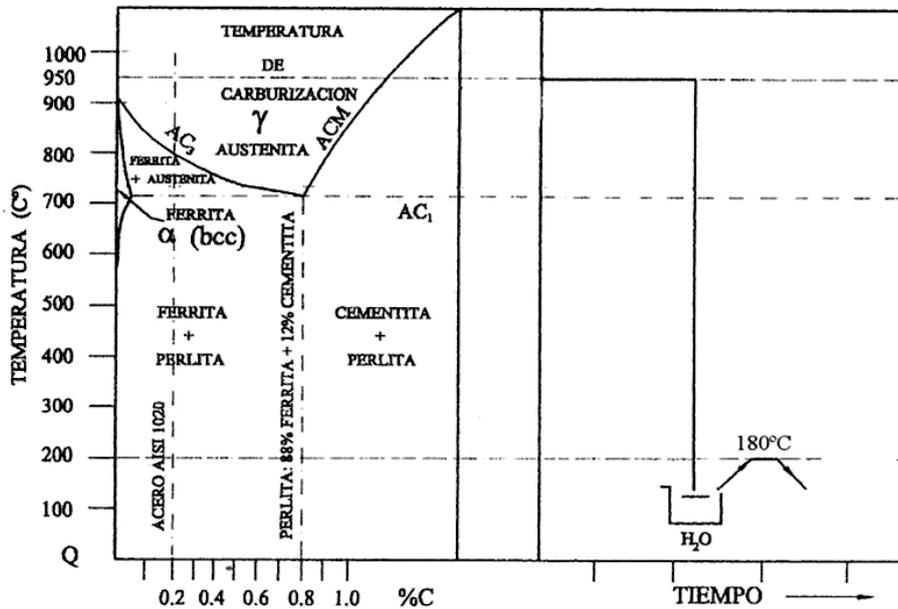


Fig. 6. Tratamiento térmico de temple y revenido de probetas carburizadas.

Fuente: KRAUSS G. "Carburizing: Processing and performance ASM International". p. 206

Ensayo de tenacidad a la fractura (K_{IC})

Utilizando la Máquina Universal Servohidráulica INSTROM de capacidad 10 Ton; primero se realizaron los ensayos de fatiga para obtener la microgrieta de fatiga y seguidamente el ensayo de tenacidad a la fractura. Durante el ensayo se obtuvo el registro de la carga aplicada frente al desplazamiento (abertura) de la grieta. El registro del ensayo determinó si es de tipo I, tipo II o tipo III; y sirvió para definir la carga crítica (P_Q). Una vez fracturada la probeta, se examinó la superficie de la fractura y se midió la profundidad de la grieta para obtener la profundidad promedio de la grieta (a), utilizando la siguiente ecuación:

$$a = \frac{\frac{a_1+a_9}{2}+a_2+a_3+a_4+a_5+a_6+a_7+a_8}{8} \quad (3)$$

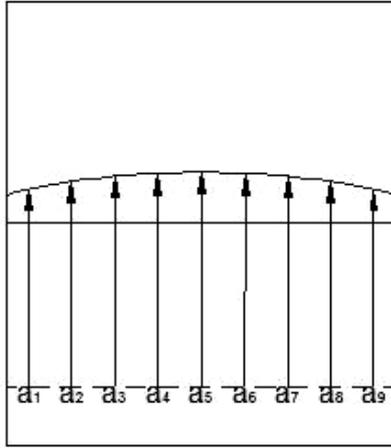


Fig. 7. Espécimen con medidas para cálculo del tamaño de grieta promedio.



Fig. 8. Superficie de fractura de la probeta.

Para el cálculo del factor geométrico $f\left(\frac{c}{w}\right)$ ó Y , se aplicó la siguiente ecuación para la probeta de tensión en compacto (TC):

$$f\left(\frac{c}{w}\right) = \frac{\left(2 + \frac{a}{w}\right)\left(0.886 + 4.64\frac{a}{w} - 13.32\frac{a^2}{w^2} + 14.7\frac{a^3}{w^3} - 5.6\frac{a^4}{w^4}\right)}{\left(1 - \frac{a}{w}\right)^{3/2}} \quad (4)$$

Para la obtención del valor de tenacidad a la fractura provisional (K_Q) se aplica la siguiente ecuación para probeta TC:

$$K_Q = \frac{P_Q}{B.W^{1/2}} \cdot f\left(\frac{c}{w}\right) \quad (5)$$

Y finalmente para considerar este valor de tenacidad a la fractura provisional (K_Q) como la tenacidad de fractura del material (K_{IC}), se compararon con las distintas restricciones fijadas por la norma ASTM E399-90.

III. RESULTADOS

3.1. Espesor de capa carburada (x)

En la Tabla 3 se lista los valores obtenidos del espesor de capa (x) en mm, medidos en el microscopio metalográfico marca Leica modelo S20 de las probetas evaluadas a diferentes temperaturas de carburización. Los valores confirmaron un aumento del espesor de capa según se incrementa las temperaturas de carburización.

Tabla 3. Valores de espesor de capa (x) a diferentes temperaturas de carburización

Temperatura de carburización (°C)	Espesor de capa carburada (X) (mm)
850	0,52
900	0,73
950	0,91
1000	1,18

3.2. Ensayo de dureza

La Tabla 4 muestra los valores promedios de la dureza superficial evaluados en la escala Rockwell C (HRC), fueron medidos utilizando el durómetro digital universal TIME GROUP – 187.5.

Tabla 4. Dureza promedio (HRC) de la superficie de la capa carburada en función de la temperatura de carburización.

Temperatura de carburización (°C)	Dureza superficial (HRC)
850	58
900	61
950	62
1000	64

3.3. Resistencia mecánica

La Tabla 5 muestra los valores promedio obtenidos de la resistencia a la tensión (σ_u) y la tensión de fluencia (σ_{ys}). Donde se observa que aumentan según se incrementa la temperatura de carburización.

Tabla 5. Resistencia a la tracción y tensión de fluencia en función de la temperatura de carburización.

Temperatura de carburización (°C)	Resistencia a la tracción Kg/mm ² (MPa)	Tensión de fluencia Kg/mm ² (MPa)
850	95 (931)	65 (637,0)
900	105 (1029)	71 (696,0)
950	118 (1156,4)	78 (764,4)
1000	124 (1215,2)	83 (813,4)

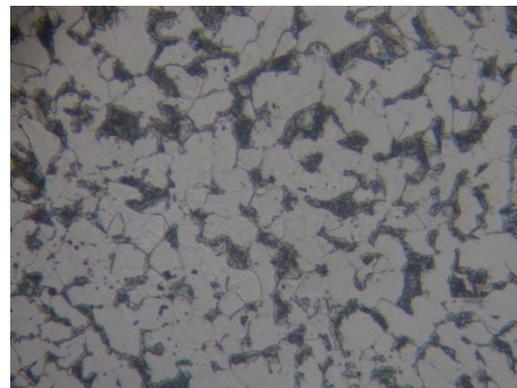
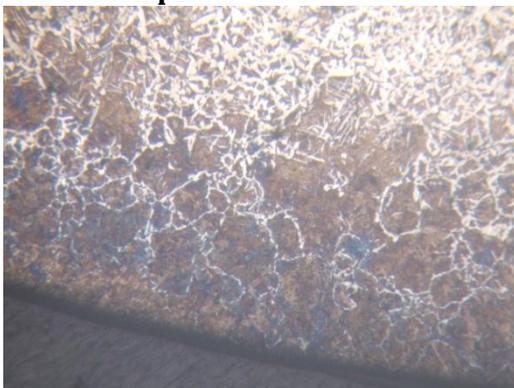
3.4. Tenacidad a la fractura (K_{Ic})

Los ensayos de tenacidad a la fractura se ejecutaron en una máquina de tracción universal servohidráulica de 10 Ton de capacidad marca INSTRON según la norma ASTM E399-90. Los valores promedio obtenidos de tenacidad a la fractura en deformación plana (K_{Ic}) se muestran en la Tabla 6.

Tabla 6. Valores de tenacidad a la fractura obtenidos del acero AISI 3215 sometido a diferentes temperaturas de carburización.

Temperatura de carburización (°C)	Tenacidad a la fractura (MPa√m)
850	121,30
900	91,40
950	84,80
1000	78,00

3.5. Análisis microestructural Antes del temple



Temple y revenido a 180°C

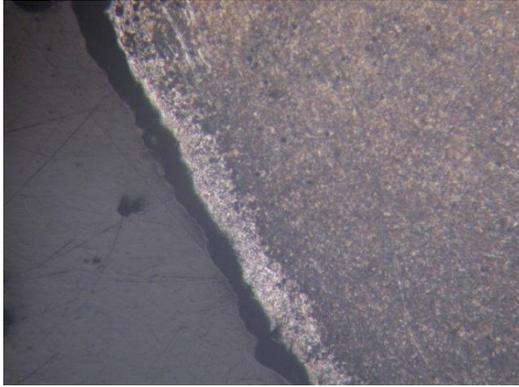


Fig. 11. Fotomicrografía del borde (superficie) del acero AISI 3215 carburizado a 900°C después del temple. Se observa claramente la capa carburizada. Ataque químico: Nital 3%. 50X.

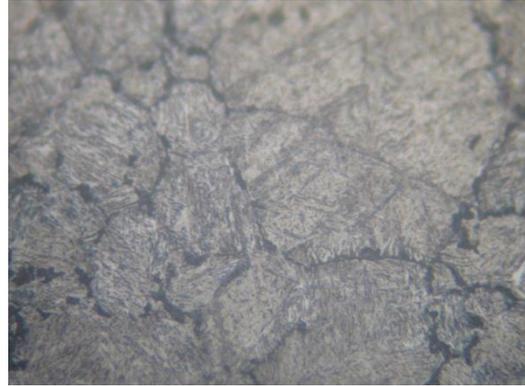


Fig. 12. Microestructura del núcleo del acero AISI 3215 carburizado a 900°C después del temple. Se observa martensita de tamaño de grano medio y bainita superior (en los límites de grano). Ataque químico: Nital 3%. 200X.

IV. DISCUSIÓN

Espesor de capa carburizada

En la Figura 13 se muestra los valores del espesor de capa (x) en función de la temperatura de carburización en el rango de 850 a 1000°C. Se observa que a medida que se incrementa la temperatura de carburización, el espesor de capa aumenta, obteniéndose un espesor de capa de 0,52 mm para 850°C y 1,18 mm para 1000°C. Esto se debe a que el espesor de capa es función de la temperatura y tiempo de carburización y que para el acero carburizado en estudio obedece la siguiente expresión: $x=2(D.t)^{1/2}$, donde x: espesor de capa (cm); D: coeficiente de difusión (cm²/s) y t: tiempo de carburización (seg.), que es una solución de la Segunda Ley de Fick, la cual establece que al incrementar la temperatura, aumenta el coeficiente de difusión (D), por lo tanto el espesor de capa carburizada y también porque el gradiente de concentración del carbono, que es necesario para que existe difusión de carbono hacia el interior del acero, aumenta según se incremente la temperatura de carburización. Esto de acuerdo a Tejedor (2005), y Mangonon (2001).

Dureza superficial

La Figura 14 muestra en forma gráfica los valores promedios de dureza superficial (HRC) de la capa carburada en función de la temperatura de carburización. Se observa que al incrementar la temperatura de carburización la dureza superficial aumenta ligeramente desde 58 HRC para 850°C hasta 64 HRC para 1000°C. Debido a que al aumentar la temperatura hay mayor solubilidad de carbono en la austenita, y con el temple se obtiene una martensita con porcentaje de carbono más alto,

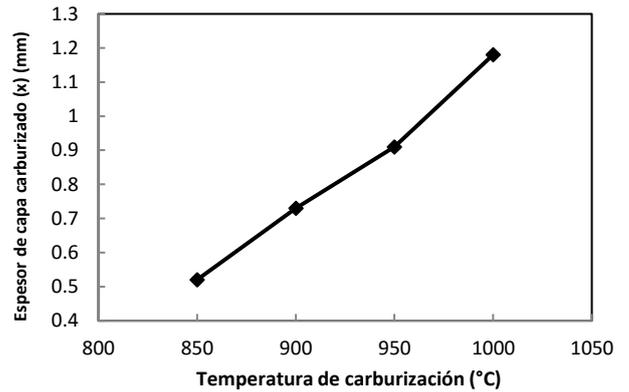


Fig. 13. Espesor de capa carburizada (x) en función de la temperatura de carburización en el acero AISI 3215.

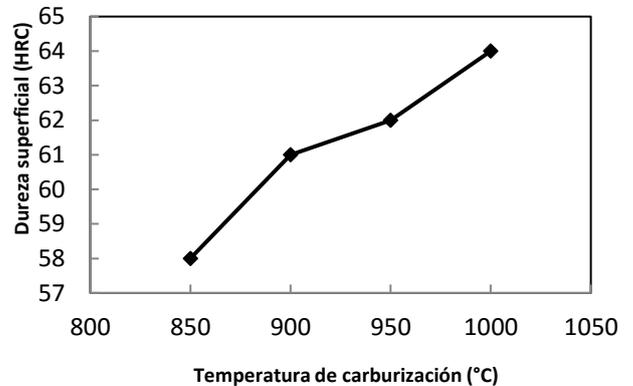


Fig. 14. Dureza superficial (HRC) en función de la temperatura de carburización en el acero AISI 3215.

endureciendo ligeramente la estructura. De acuerdo a Krauss (1999).

Resistencia mecánica

En la Figura 15 se muestra en forma gráfica los valores promedios obtenidos de la resistencia a la tensión (σ_u) y la tensión de fluencia (σ_{ys}). Se observa que conforme se incrementa la temperatura de carburización aumenta la resistencia a la tensión (σ_u) y la tensión de fluencia (σ_{ys}). Debido a que al incrementar la temperatura de carburización aumenta el espesor de capa carburada (x) y porque la zona periférica está formada por martensita y cementita, la zona media formada por martensita y la zona central formada por martensita y algo de bainita superior, haciendo que al material sea más resistente. De acuerdo a Martínez (2008), y Corina (2007).

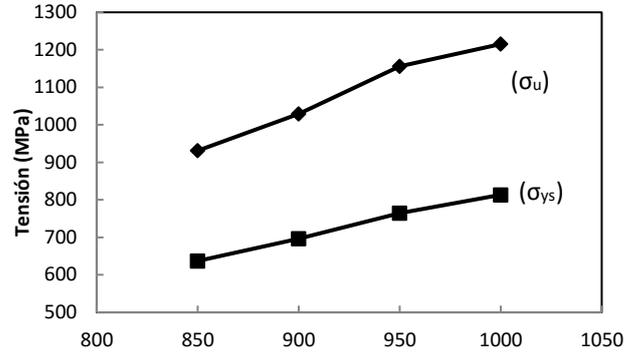


Fig. 15. Resistencia a la tensión (σ_u) y tensión de fluencia (σ_{ys}) en función de la temperatura de carburización en el acero AISI 3215.

Tenacidad a la fractura

La Figura 16 muestra en forma gráfica los valores promedios de la tenacidad a la fractura en deformación plana (K_{IC}) evaluados según la norma ASTM E399-90 con respecto a la temperatura de carburización. Esta muestra que un incremento de la temperatura de carburización trae consigo una disminución de la tenacidad a la fractura (K_{IC}). El estudio reporta un valor de $121,20 \text{ MPa}\sqrt{m}$ para 850°C y $78 \text{ MPa}\sqrt{m}$ para 1000°C . Esto debido a que el espesor de capa carburada y el tamaño de grano tanto en la superficie como en el núcleo aumentan según se incrementa la temperatura de carburización, haciendo más frágil y por ende disminuyendo la tenacidad a la fractura. De acuerdo a Mangonon (2001).

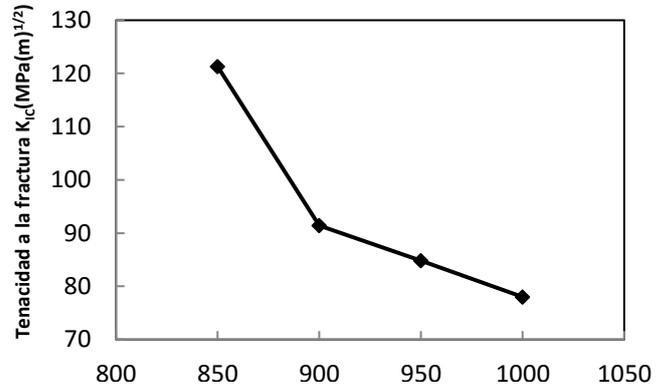


Fig. 16. Tenacidad a la fractura (K_{IC}) en función de la temperatura de carburización en el acero AISI 3215.

La Figura 17 muestra la influencia de la resistencia a la tensión en la tenacidad a la fractura (K_{IC}) y la tensión de fluencia (σ_{ys}). Se observa que a medida que se incrementa la resistencia a la tensión (σ_u), la tenacidad a la fractura (K_{IC}) disminuye y la tensión de fluencia (σ_{ys}) aumenta en el acero AISI 3215 carburizado a las temperaturas de 850, 900, 950 y 1000°C .

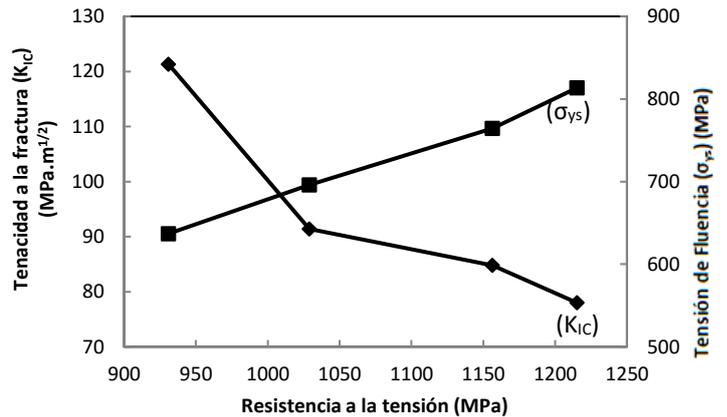


Fig. 17. Influencia de la resistencia a la tensión en la tenacidad a la fractura (K_{IC}) y tensión de fluencia (σ_{ys}) en un acero AISI 3215 carburizado a las temperaturas de estudio.

V. CONCLUSIONES

- En la difusión de carbono en el acero AISI 3215 se cumple con la segunda ley de Fick, porque los espesores de capa (x) teórico tienen valores aproximados a los del espesor de capa experimental y obedece a $x = 2\sqrt{D \cdot t}$.
- La dureza superficial de la capa carburizada aumenta ligeramente con el incremento de la temperatura de carburización, debido a que la superficie está formada por martensita y cementita.
- La tenacidad a la fractura en deformación plana (K_{IC}) disminuye con el incremento de la temperatura de carburización.
- La curva registró, carga vs desplazamiento, para la temperatura de carburización de 850°C, es de tipo I y para las temperaturas de 900, 950 y 1000°C es de tipo III.
- El incremento de la temperatura de carburización aumenta la resistencia a la tracción (σ_u) y la tensión de fluencia (σ_{ys}) pero disminuye la tenacidad a la fractura (K_{IC})

VI. REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- ASTM E399-90. 1990. **Standard test method for fracture toughness of metallic materials**. American Society for Testing of Materials. Philadelphia. EE.UU.
- BOHLER. 2005. **Manual de aceros especiales**. Lima. Perú. (pp. 18-20).
- BRIS, D.; LLAVES, L.; CARELO, J. 2005. **Evaluación de la tenacidad a la fractura en aceros sinterizados de alta densidad**. Ingeniería & Desarrollo N° 19. Universidad del Norte. Cuba. (pp. 31-43)
- CORINA. 2007. **Comportamiento a la fatiga de un acero SAE 1022 recubierto con capa carburada obtenida por cementación sólida**. Ciencia & Desarrollo. Cuba. (pp. 95-100).
- GONZALES, V. 2004. **Mecánica de fractura**. Editorial Limusa. México. (pp. 13-29).
- HOFFMANN, R.; VOGEL, V. 1998. **Cementation – trempe – oxydation marginale, étendue et effets**. Traitement Thermique N° 309. Italia. (pp. 13-19).
- KRAUSS, G. 1999. **Carburizing: Processing and performance ASM international**. Philadelphia. EE.UU. (pp. 195-210).
- MARTINEZ, M.; PALACIOS, J. 2008. **Principio del tratamiento térmico**. Pedeca Press Publicaciones. S.L.U. Vol. 1. Madrid. España. (pp. 113-128).
- MANGONON, P. 2001. **Ciencia de Materiales, Selección y Diseño**. Editorial Prentice – Hall Hispanoamericana S.A. México. (pp. 219-239).
- NAVARA, E.; BENGTTSSON, B. (1984). **Fracture toughness of P/M steels**. Int. Journal of Powder Metallurgy & Powder Technology 20. EE.UU. (pp. 33-43).
- SHEN – CHIN LEE; WEIO – YOUEHO. (1987). **The effects of surface hardenings and fracture toughness of carburized steel**. Department of Materials Engineering, Tatung, Institute of technology 1045. Taipei. Taiwan. (pp. 20-25).
- SHUKLA, A. (2005). **Practical fracture mechanics indesign**. Second edition. University of Rhode Island. USA.
- TAVARA, A. (2006). **Influencia del tiempo de revenido sobre la tenacidad a la fractura en deformación plana K_{IC} en el acero AISI 1045**. Investigación. Desarrollo e Investigación (I+D+I). Vol. 21. Perú. (pp. 12-15).
- TEJEDOR, J. (2005). **Estudio de la capa de difusión de carburización en función de la temperatura y tiempo de proceso**. Pedeca Press Publicaciones. S.L.U. Madrid. España. (pp. 116-132).
- THORNTON, P.; COLANGELO, V. (1987). **Ciencia de materiales para ingeniería**. Editorial Prentice – Hall Hispanoamericana S.A. México. (pp. 276-300).