

Influencia en las propiedades mecánicas del acero AISI-SAE 1045 tratado térmicamente con temple a temperatura intercrítica y revenido

Influence on mechanical properties of AISI-SAE 1045 steel with heat treatment at intercritical temperature quenching and tempering

Jonathan Rodolfo Garzón Torres¹, Carlos Arturo Bohórquez Avila², Mauro Enrique Hernandez³, Héctor Fernando Rojas Molano⁴

¹ Estudiante del Programa de Ingeniería Mecánica, Facultad de Ingeniería, Universidad Libre, jonathanr.garzon1@unilibrebog.edu.co

² PhD(c) en Ingeniería Ciencia y Tecnología de Materiales Universidad Nacional, DIMJ Universidad Libre, carlosa.bohorquez@unilibrebog.edu.co

³ MsC(c) en Materiales y Procesos Universidad Nacional, Instructor Centro de Materiales y Ensayos SENA, mebernandez@misena.edu.co

⁴ PhD(c) en Ingeniería Ciencia y Tecnología de Materiales Universidad Nacional, DIMJ Universidad Libre, hectorf.rojas@unilibrebog.edu.co

Fecha de recepción: 20/10/2016 Fecha de aceptación del artículo: 20/12/2016

Resumen

En esta investigación se determinó la influencia en las propiedades mecánicas del acero AISI-SAE 1045 tratado térmicamente con temple a temperatura intercrítica de 760°C, durante 30 minutos y revenido a 400°C, por un periodo de tiempo de 10, 20 y 30 minutos. El número de probetas utilizadas para este trabajo se obtuvieron mediante el método de curvas de varianza. El estudio de los resultados se realizó comparando los datos de los ensayos del material en estado de entrega vs los tratamientos efectuados. Las pruebas efectuadas fueron las de: dureza con el durómetro GNEHM 160 RODI, metalografía óptica convencional con el microscopio óptico metalográfico invertido ZEISS Axio Observer.Z1m, tensión con la máquina universal de ensayos SHIMADZU UH-50A y de impacto Charpy con la máquina SATEC SYSTEMS, INC. Model No. SI-1A. Como resultado de estos tratamientos, se pudo evidenciar martensita revenida a nivel microestructural en las tres temperaturas de revenido utilizadas y un incremento en la dureza y en la resistencia a la tensión y una disminución en la fragilidad para este acero.

Palabras clave

Aceros doble fase, Martensita, Martensita Revenida, Revenido, Temple.

Abstract

In this research, it was studied the influence on mechanical properties of AISI-SAE 1045 steel with heat treatment quenching at intercritical temperature of 760° C for 30 minutes and tempering at 400° C, during 10 minutes, 20 minutes and 30 minutes. The number of samples used for this work obtained by the variance curves method. The results of this study was conducted using comparing the test data of material delivery status vs treatments made. The tests were hardness with GNEHM 160 RODI durometer, conventional optical metallography with the optical metallographic inverted ZEISS Axio Observer.Z1m microscope, tension with SHIMADZU UH50 universal testing machine and Charpy impact with SATEC SYSTEMS, INC. Model No. SI-1A machine. As results of these treatments, tempered martensite was evident microstructural level in the three tempering temperatures used and an increase in hardness and tensile strength and a decrease in fragility to this steel.

Keywords

Dual phase steels, Martensite, Quenching, Tempering, Tempered Martensite.

1. Introducción

Los aceros de doble fase (DP) son desarrollados por la necesidad de tener aceros más ligeros en la industria automotriz, se caracterizan en general por la combinación de alta resistencia con buena ductilidad, además de generar un ahorro de energía en la producción automóbiles, lo que los vuelve más amigables con el medio ambiente que otro tipo de aceros, pero este tipo de aceros se pueden extender potencialmente a la industria minera [1, 2, 3].

Para obtener un acero (DP) es necesario llevar el acero a la zona $\alpha+\gamma$ del diagrama Fe-C, esto dentro del rango de temperaturas comprendidas entre A_1 y A_3 , llamado también de temperaturas intercríticas [4]; realizando un enfriamiento rápido desde estas temperaturas la austenita presente se transforma en martensita obteniendo las dos fases (martensita y ferrita) a temperatura ambiente. La temperatura de revenido que se encuentra por debajo de A_1 afecta la microestructura y las propiedades mecánicas de los aceros de doble fase [5, 6, 7], esto debido al proceso de transformación térmica [8, 9, 10, 11] que se realiza en la martensita (microestructura extremadamente dura y frágil que imposibilita su uso en la mayoría de las aplicaciones para un acero que la contenga), para obtener martensita revenida que es una microestructura que reduce la fragilidad, aumenta la ductilidad y la tenacidad del acero [12, 13] esto en el rango de temperaturas elevadas de revenido (400 a 700°C) [14].

La mejora de las propiedades mecánicas de un sencillo acero de medio carbono en lugar de un acero de bajo carbono son importantes [15] debido a su relativo bajo costo y su gran variedad de aplicaciones en la construcción e ingeniería. Partiendo del acero AISI-SAE 1045, se realizó la investigación del efecto que tiene el temple desde temperaturas intercríticas y revenido sobre las propiedades mecánicas y sobre la microestructura de este acero de media aleación.

2. Metodología

Para esta investigación se trabajó con un acero AISI-SAE 1045 el cual presenta la composición química de la Tabla 1 obtenida por medio del Análisis Químico por Espectrometría de Emisión Óptica (o de Chispa)

que se realizó en este acero en estado de entrega, además en la Figura 1 se muestra la microestructura obtenida para este acero en estado de entrega en la cual se aprecia claramente ferrita (F) y perlita (P), y en la Figura 2 se notan las inclusiones propias para este acero en estado de entrega.

Tabla 1. Composición química del acero AISI-SAE 1045.

C%	Mn%	S%	Si%	Ni%	Cr%	V%	Mo%
0.425	0.728	0.018	0.247	0.06	0.169	0.01	0.021
W%	P%	Ti%	Sn%	Al%	Nb%	B%	Pb%
0.005	0.01	0.001	0.001	0.001	0.002	0.00	0.007

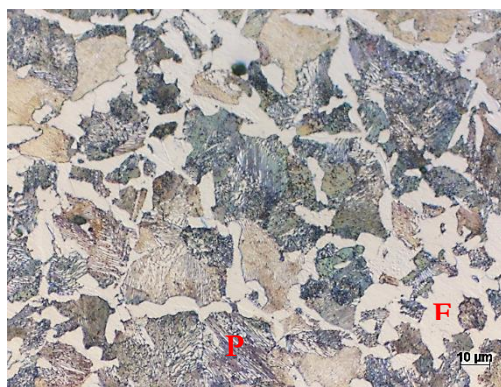


Figura 1. Microestructura del acero AISI-SAE 1045 en estado de entrega a 1000X. Atacada con Nital al 3%.



Figura 2. Inclusiones del acero AISI-SAE 1045 en estado de entrega a 100X.

Este acero se utiliza generalmente sin tratamiento térmico [16] o en su defecto normalizado. En esta investigación se realizó un tratamiento térmico desde temperaturas intercríticas (IHT) en este acero. Las temperaturas intercríticas se pueden calcular con las ecuaciones 1 y 2 [17], en las cuales se obtienen las temperaturas en grados Celsius:

$$Ac_1 = 723 - 7.08Mn + 37.7Si + 18.1Cr + 44.2Mo + 8.95Ni + 50.1V + 21.7Al + 3.18W + 297S - 830N - 11.5CSi - 14.0MnSi - 3.10SiCr - 57.9CMo - 15.5MnMo - 5.28CNi - 6.0MnNi + 6.77SiNi - 0.80CrNi - 27.4CV + 30.8MoV - 0.84Cr^2 - 3.46Mo^2 - 0.46Ni^2 - 28V^2 \quad (1)$$

$$Ac_3 = 912 - 370C - 27.4Mn + 27.3Si - 6.35Cr - 32.7Ni + 95.2V + 190Ti + 72.0Al + 64.5Nb + 5.57W + 332S + 276P + 485N - 900B + 16.2CMn + 32.3CSi + 15.4CCr + 48.0CNi + 4.32SiCr - 17.3SiMo - 18.6SiNi + 4.80MnNi + 40.5MoV + 174C^2 + 2.46Mn^2 - 6.86Si^2 + 0.322Cr^2 + 9.90Mo^2 + 1.24Ni^2 + 60.2V^2 \quad (2)$$

Se obtiene la temperatura de A_1 de 732°C y A_3 de 791°C . Con base en esto el tratamiento se llevó a cabo seleccionando una temperatura de 760°C comprendida entre A_1 y A_3 durante 30 minutos de sostenimiento, para después realizar un temple en agua. Luego se realizó unos tratamientos térmicos de revenido, estos tratamientos se llevaron a cabo seleccionando la temperatura de 400°C que se encuentran por encima de M_s durante 10, 20 y 30 minutos de sostenimiento, para posteriormente enfriarse. La temperatura de M_s se puede calcular con la ecuación 3 [18], de la cual se obtiene la temperatura en grados Celsius:

$$M_s = 539 - 423C - 30.4Mn - 17.7Ni - 12.1Cr - 11.0Si - 7.0Mo \quad (3)$$

Se obtiene la temperatura de M_s de 331°C . Por medio del diseño experimental de curvas de operación característica para el análisis de varianza del modelo con efectos fijos [19] se obtuvo el número de probetas necesarias para obtener resultados con una alta confiabilidad estadística del 96%, dando como resultado 3 probetas para caso analizado (estado de entrega, temple a 760°C por 30 minutos, revenido a 400°C por 10 minutos, revenido a 400°C por 20 minutos y revenido a 400°C por 30 minutos), para un total de 15 probetas. Se fabricaron las probetas de acuerdo a las normas ASTM E8-00b [20] y E23-00 [21]. Estas probetas fueron sometidas a los tratamientos anteriormente mencionados.

Posteriormente se desarrollaron las pruebas de tensión con la máquina universal de ensayos SHIMADZU UH-50A, de estas probetas se sacaron muestras que

fueron pulidas y llevadas a brillo espejo por medio de la suspensión de diamante monocristalina de $1\ \mu\text{m}$ Metkon referencia 39-410-M para luego ser atacada cada muestra con Nital al 3% y así poder observar las microestructuras en cada caso analizado por medio de la metalografía óptica convencional con el microscopio metalográfico invertido ZEISS Axio Observer.Z1m; utilizando estas muestras se llevaron a cabo las pruebas de dureza mediante el durómetro GNEHM 160 RODI. Finalmente se realizaron las pruebas de impacto Charpy con la máquina SATEC SYSTEMS, INC. Model No. SI-1A.

3. Resultados y discusión

3.1 Resistencia a la tensión

Los resultados de las pruebas de tensión para cada caso analizado se muestran en la Figura 3 y Tabla 2.

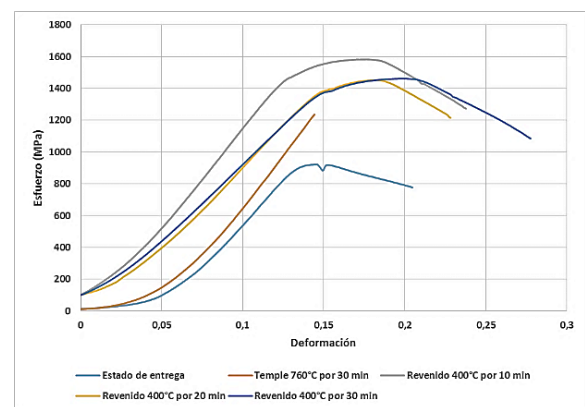


Figura 3. Diagramas de esfuerzo-deformación para el acero AISI-SAE 1045.

En la Figura 3 se observa en los diagramas de esfuerzo-deformación para el acero AISI-SAE 1045 el aumento de la deformación en las curvas de los revenidos respecto a la obtenida en estado de entrega de color azul claro, pero al contrario sucede con la curva del temple a temperatura intercrítica de color rojo que disminuye su deformación notablemente respecto a la obtenida en estado de entrega. El mayor aumento de la deformación se obtiene al realizar el tratamiento de revenido de 400°C por 30 minutos comparado con el estado de entrega.

Tabla 2. Esfuerzo máximo de las probetas de tensión para cada caso analizado.

Estado de Entrega	Temple 760 °C por 30 min	Revenido 400°C por 10 min	Revenido 400°C por 20 min	Revenido 400°C por 30 min
921 MPa	1240 MPa	1583 MPa	1453 MPa	1463 MPa

En la Tabla 2 se detalla los valores del esfuerzo máximo alcanzado por el acero AISI-SAE 1045 durante las pruebas de tensión, en la cual es significativo el aumento para todos los tratamientos térmicos realizados: de 310 MPa en el temple intercrítico, de 662 MPa en el revenido por 10 minutos, de 532 MPa en el revenido por 20 minutos y de 542 MPa en el revenido por 30 minutos; el mayor aumento del esfuerzo máximo se obtiene para el tratamiento de revenido de 400°C por 10 minutos comparado con el estado de entrega.

3.2 Microestructura

Los cambios microestructurales son evidentes para los tratamientos térmicos realizados, las probetas que fueron sometidas al tratamiento de temple a temperatura intercrítica presenta en la Figura 4 una estructura compuesta por martensita (M) y ferrita (F), típica de los aceros doble fase. Además, en la Figura 5 se aprecia como las inclusiones disminuyeron respecto al acero en estado de entrega después de realizado el tratamiento de temple a temperatura intercrítica, esto como consecuencia del choque térmico que se produjo en el acero durante este tratamiento térmico.

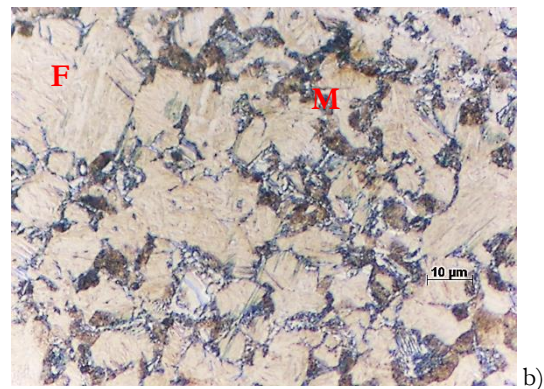
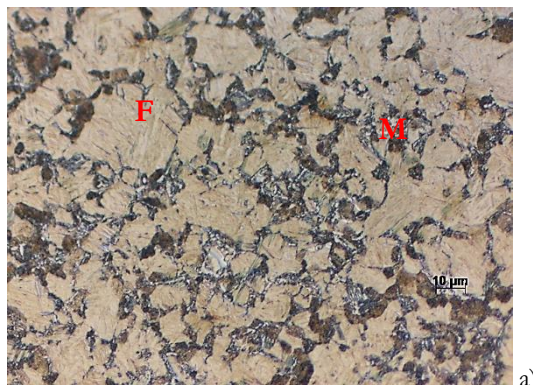


Figura 4. Microestructuras del acero AISI-SAE 1045 templado a 760°C por 30 minutos. a) 1000X atacada con Nital al 3%, b) 1600X atacada con Nital al 3%.



Figura 5. Inclusiones del acero AISI-SAE 1045 templado a 760°C por 30 minutos a 100X.

En las Figuras 6 y 7 se observan las microestructuras de las probetas que fueron sometidas a los tratamientos de revenido en las cuales se aprecia como la martensita se transformó en martensita revenida (MR), esto se ve reflejado en el cambio de los valores de la dureza medidos respecto al temple a temperatura intercrítica.



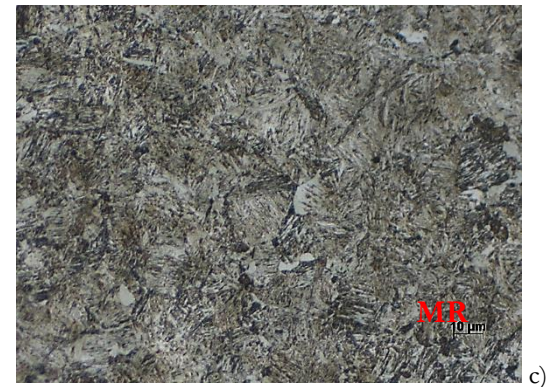
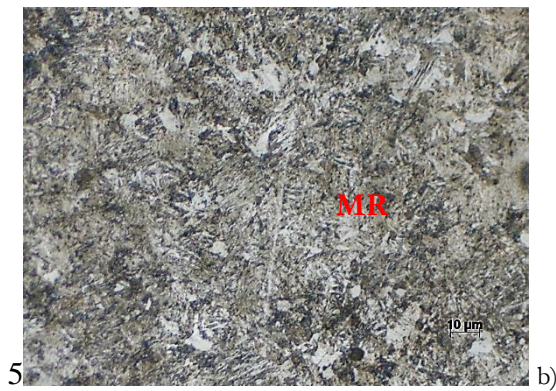


Figura 6. Microestructuras del acero AISI-SAE 1045 revenido a 400°C por diferentes tiempos, 1000X atacadas con Nital al 3%.
a) 10 minutos, b) 20 minutos, c) 30 minutos

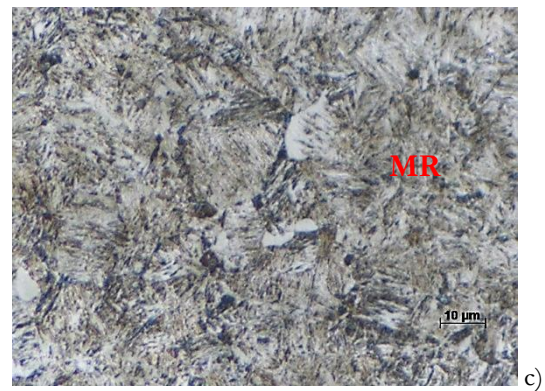
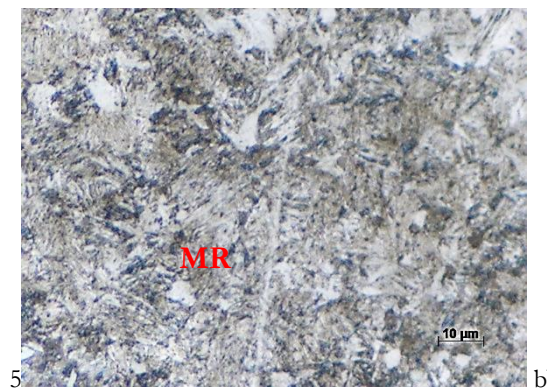
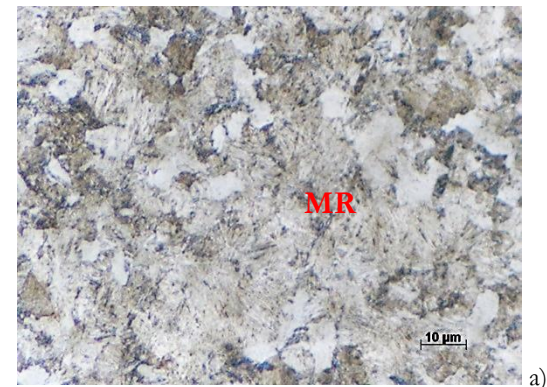


Figura 7. Microestructuras del acero AISI-SAE 1045 revenido a 400°C por diferentes tiempos, 1600X atacadas con Nital al 3%.
a) 10 minutos, b) 20 minutos, c) 30 minutos.

3.3 Dureza

Los resultados de las pruebas de dureza para cada caso analizado se muestran en la Figura 8.

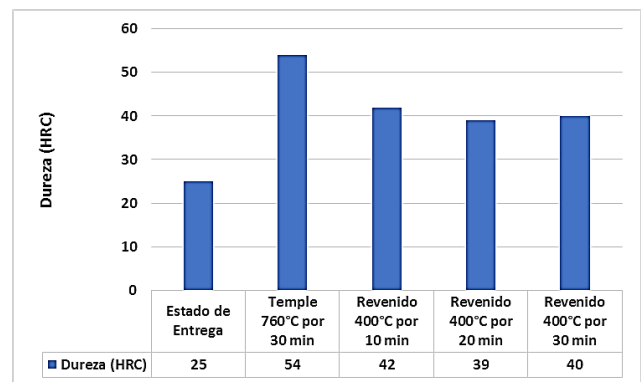


Figura 8. Dureza promedio para el acero AISI-SAE 1045 para cada caso analizado.

En la Figura 8 se observa como los valores de la dureza obtenidos para el acero AISI-SAE 1045 aumentaron para todos los tratamientos térmicos realizados respecto al valor obtenido en estado de entrega: para el temple intercrítico 29 HRC, para el revenido por 10 minutos 17 HRC, para el revenido por 20 minutos 14 HRC y para el revenido por 30 minutos 15 HRC; el mayor aumento de la dureza se produce en el tratamiento de temple a temperatura intercrítica esto debido a la aparición de martensita. Los valores de la dureza obtenidos para los tratamientos de revenido son un poco menores respecto al temple a temperatura intercrítica pero significativamente mayores al valor obtenido en estado de entrega, esto se debe a la transformación térmica que sufrió la martensita durante estos tratamientos de revenido.

3.4 Resistencia al impacto

Los resultados de las pruebas de impacto para cada caso analizado se muestran en la Figura 9.

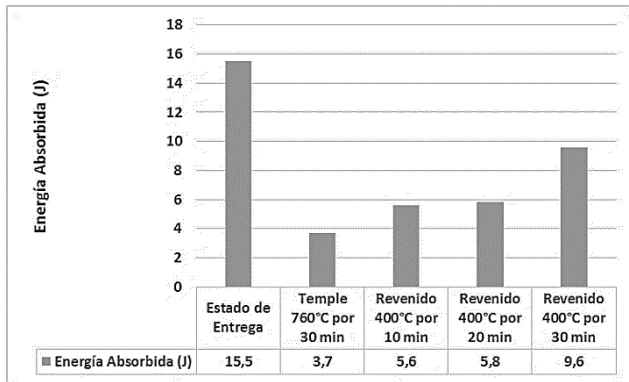


Figura 9. Energía absorbida promedio para el acero AISI-SAE 1045 para cada caso analizado.

En la Figura 9 se aprecia como los valores de la energía absorbida obtenidos para el acero AISI-SAE 1045 disminuyeron en todos los tratamientos térmicos realizados con respecto al valor obtenido en estado de entrega: 11,8 J en el temple intercrítico, 9,9 J en el revenido por 10 minutos, 9,7 J en el revenido por 20 minutos y de 5,9 J en el revenido por 30 minutos; la menor disminución de la energía absorbida se genera en el tratamiento de revenido de 400°C por 30 minutos comparado con el estado de entrega debido al mayor tiempo de sostenimiento de este tratamiento lo que permite que se alivien una mayor cantidad de tensiones internas producidas durante el tratamiento de temple a temperatura intercrítica.

3.5 Comparación de resultados

En la Figura 10 se aprecia que la tendencia es polinómica de segundo orden para los valores de la dureza obtenidos después de efectuados los tratamientos térmicos en el acero AISI-SAE 1045, esta tendencia se relaciona directamente con la transformación térmica que se generó en la martensita durante los tratamientos de revenido.

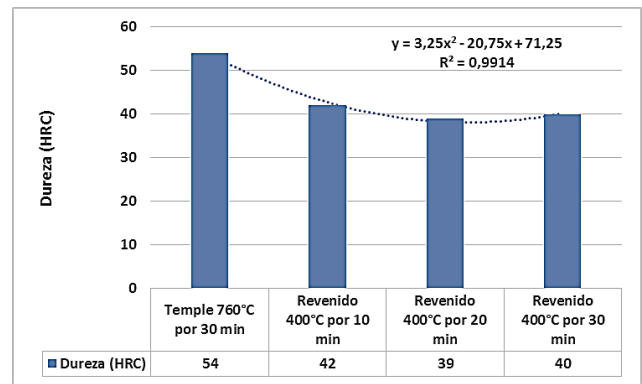


Figura 10. Línea de tendencia de la dureza promedio para los tratamientos térmicos efectuados en el acero AISI-SAE 1045.

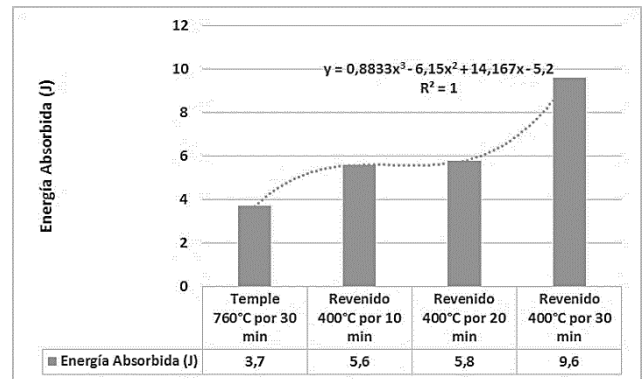


Figura 11. Línea de tendencia de la energía absorbida promedio para los tratamientos térmicos efectuados en el acero AISI-SAE 1045.

En la Figura 11 se aprecia que la tendencia es polinómica de tercer orden para los valores de la energía absorbida obtenidos después de realizados los tratamientos térmicos en el acero AISI-SAE 1045 esta tendencia se relaciona claramente con la recristalización de la martensita durante los tratamientos de revenido y esto generó una reducción en los esfuerzos residuales causados durante el temple a temperatura intercrítica.

En la Figura 12 se observa el diagrama de la dureza vs la energía absorbida para los tratamientos térmicos efectuados en el acero AISI-SAE 1045 y su tendencia es polinómica de segundo orden para los valores de la dureza obtenidos. Cabe resaltar que existe una transición entre la dureza y la energía absorbida dentro del 3° y 4° punto de la Figura 12 que corresponden a los tratamientos de revenido a 400°C por 10 minutos y revenido a 400°C por 20 minutos respectivamente.

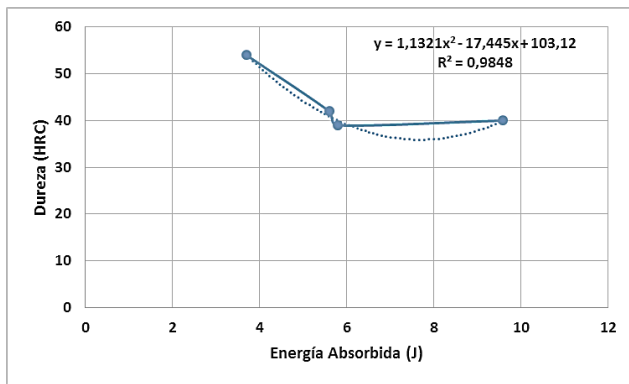


Figura 12. Diagramas de la dureza vs la energía absorbida para los tratamientos térmicos efectuados en el acero AISI-SAE 1045.

Los tratamientos térmicos de temple a temperatura intercrítica y revenido afectan sustancialmente las propiedades mecánicas del acero AISI-SAE 1045, se encontró que los mejores resultados se obtienen al realizar el temple intercrítico a 760°C por 30 minutos seguido de un revenido a 400°C por 30 minutos esto se puede apreciar en la Figura 13 mediante la comparación de los valores de esfuerzo máximo, dureza y energía absorbida obtenidos en los ensayos del material en estado de entrega vs los tratamientos térmicos efectuados.

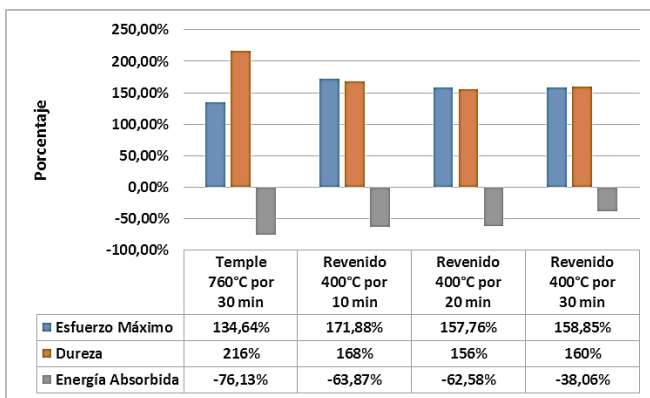


Figura 13. Comparación de los valores de esfuerzo máximo, dureza y energía absorbida para el acero AISI-SAE 1045 para cada caso analizado.

Conclusiones

Los cambios en las propiedades mecánicas para este acero coinciden con lo descrito en la teoría, luego de ser templado a temperatura intercrítica este material se hace más resistente a la tensión y duro, pero más frágil debido a la formación de martensita que crea grandes tensiones residuales en el acero; después se hace el

tratamiento de revenido en el cual la precipitación y recristalización de la martensita afecta directamente las propiedades del material, al reducir la fragilidad y dureza, aumentar la ductilidad y la resistencia a la tensión del acero, y reducir los esfuerzos residuales del acero al acercarse más al equilibrio por medio de la martensita revenida. Estos cambios se presentan durante los tratamientos de revenido efectuados a 400°C en los diferentes tiempos y se observan con claridad en la Figura 13, siendo mayormente notorios para el tratamiento de revenido por 30 minutos.

Finalmente, los resultados obtenidos indican que existe en el acero AISI-SAE 1045 una transición de las propiedades mecánicas de la dureza y la resistencia al impacto después de realizar el tratamiento térmico de revenido a 400°C entre el rango de los 10 y 20 minutos de sostenimiento. Por lo cual se sugiere realizar una investigación que analice en detalle este fenómeno encontrado para este acero.

Agradecimientos

Los autores agradecemos de antemano al coordinador académico el ingeniero Victor Barrientos y al instructor Andres Gil que pertenecen al Centro de Materiales y Ensayos (CME) Regional Distrito Capital del SENA, por su colaboración y asesoría en la utilización de los distintos equipos dentro de sus instalaciones para el desarrollo de esta investigación.

Referencias

1. Ersoy E., Oğuz G.B. (2013). A Study of Microstructure and Phase Transformations of Medium Carbon Dual Phase Steels. *Metal* 2013, 5, 15-17.
2. Džupon M., Parilák L., Kollárová M., Sinaiová I. (2007). Dual Phase Ferrite-Martensitic Steel Micro-Alloyed With V-Nb. *METABK*, 46 (1), 15-20.
3. Hayashi K., Miyata K., Katsuki F., Ishimoto T., Nakano T. (2013). Individual Mechanical Properties of Ferrite and Martensite in Fe-0.16 mass% C-1.0 mass% Si-1.5 mass% Mn Steel. *Journal of Alloys and Compounds*, 577, S1, S593-S596.

4. Li Z., Wang T.S., Zhang X.J., Zhang F.C. (2012). Annealing Softening Behaviour of Cold-Rolled Low-Carbon Steel With a Dual-Phase Structure and the Resulting Tensile Properties. *Materials Science and Engineering A*, 552, 204-210.
5. Anazadeh A., Kheirandish S. (2012). Affect of the Tempering Temperature on the Microstructure and Mechanical Properties of Dual Phase Steels. *Materials Science and Engineering A*, 532, 21-25.
6. Kamp A., Celotto S., Hanlon D.N. (2012). Effects of Tempering on the Mechanical Properties of High Strength Dual-Phase Steels. *Materials Science and Engineering A*, 538, 35-41, 2012.
7. Renzetti R.A., Sandim H.R., Sandim M.J., Santos A.D., Möslang A., Raabe D. (2011). Annealing Effects on Microstructure and Coercive Field of Ferritic–Martensitic ODS Eurofer Steel. *Materials Science and Engineering A*, 528, 1442-1447.
8. Krauss G. (2005). *Steels: Processing, Structure, and Performance*. ASM International, United States of America.
9. Totten G.E. (2007). *Steel Heat Treatment: Metallurgy and Technologies*. Taylor & Francis Group, United States of America.
10. Valencia A. (2009). *Tecnología del tratamiento térmico de los metales*. Editorial Universidad de Antioquia, Medellín.
11. Lin K.-N., Wu S.-K., Wu L.-M. (2009). Martensitic Transformation of Cold-Rolled and Annealed Ti₅₀Ni₄₀Cu₁₀ Shape Memory Alloy. *Materials Transactions*, 50, 11, 2637-2642.
12. Rodriguez M. (2007). Efecto de la Martensita Revenida en el Mejoramiento de las Propiedades Mecánicas de un Acero Microaleado A – 572 Nb. *Acta Microscopica*, 16, 1-2, (Supp.2).
13. Bello K.A., Hassan S.B., Abdulwahab M. (2007). Effects of Tempering on the Microstructure and Mechanical Properties of Low Carbon, Low Alloy Martensitic Steel. *Journal of Applied Sciences Research*, 3(12), 1719-1723.
14. Hoyos J.J., Ghilarducci A., Salva H., Chaves C., Vélez J. (2010). Efecto de la Temperatura de Revenido y el Tiempo de Sostentamiento en Aceros al Carbono. *Revista SAM*, 7, 3, 5-16.
15. Zahid S., Hector P.P., Salam A., Ahmad J. (2009). Effect of Different Phase Proportions of Martensite on the Mechanical Properties of a Dual Phase Steel. *Journal of Scientific Research*, 39, 2, 35-39.
16. Mazuera D., Ortiz A. (2011). Evaluación de los Parámetros de Temple y Revenido Para el Acero AISI/SAE1045 a Escala Industrial. *Scientia Et Technica*, 16, 49, 25-29.
17. Kasatkin O.G., Vinokur B.B., Pilyushenko V.L. (1984). Calculation Models for Determining the Critical Points of Steel. *Metal Science and Heat Treatment*, 26, 1-2, 27-31.
18. Andrews K.W. (1965). Empirical Formulae for the Calculation of Some Transformation Temperatures. *Journal of the Iron and Steel Institute*, 203, 7, 721-727.
19. Montgomery D.C. (2004). *Diseño y Análisis de Experimentos*, Editorial Limusa, México.
20. ASTM E8-00b Standard Test Methods for Tension Testing of Metallic Materials.
21. ASTM E23-00 Standard Test Methods for Notched Bar Impact Testing of Metallic Materials.