

Evaluación de los parámetros de temple y revenido para el acero AISI/SAE1045 a escala industrial

Assessment of quench and tempering conditions for AISI/SAE1015 steel at industrial scale.

David Mazuera Robledo¹, Andrés Ortiz Cárdenas²
 Corporación Eco-eficiente, Medellín, Colombia
 aortiz@forjasbolivar.com
 d.mazuera@corpoece.org

Resumen— Se realizó un experimento del tipo “mover un factor a la vez” (OFAT) para evaluar diferentes combinaciones de temperatura y tiempo en los tratamientos térmicos de temple y revenido del acero AISI-SAE 1045 a escala industrial. La evaluación se realizó con base en el análisis de la microestructura y dureza obtenidas en cada tratamiento térmico. Los resultados obtenidos sugieren que en condiciones industriales la temperatura recomendada para austenización del acero AISI/SAE1045 es 870°C y que puede existir una relación entre la temperatura de austenización y la tetragonalidad de la martensita obtenida al templar aceros simples al carbono.

Palabras clave— acero AISI/SAE 1045, revenido, temple, tetragonalidad de la martensita.

Abstract— A One-Factor-at-a-Time (OFAT) experiment was carried out to assess different time-temperature combination for quench and tempering heat treatment of AISI/SAE 1045 steel under industrial conditions. The assessment was based upon microstructural analysis and hardness measurements. It was found that 870°C would be the recommended austenizing temperature for AISI/SAE 1045 steel. It was also found that a relationship between austenizing temperature and tetragonality of obtained martensite could exist for carbon steels.

Key Word — AISI/SAE 1045 steel, quenching, tempering, tetragonality of martensite.

I. INTRODUCCIÓN

El acero bajo¹ especificación AISI/SAE 1045 es un acero simple al carbono con un porcentaje en peso de dicho elemento que oscila entre 0,42% y 0,5%, razón por la cual también es clasificado como un acero de medio carbono [1]-[3]. En Colombia, este material es utilizado de manera

frecuente como acero de construcción mecánica para la fabricación de piezas forjadas a las cuales se les confieren las propiedades mecánicas requeridas mediante tratamientos térmicos de temple y revenido. Por lo anterior, la obtención de piezas cuyas propiedades satisfagan los requerimientos de diseño depende directamente de un adecuado control y conocimiento de los parámetros del tratamiento térmico al que son sometidas una vez son fabricadas.

Dada el uso extensivo del acero AISI/SAE 1045 tanto en Colombia como en el mundo no es de sorprender que exista en la literatura amplia información acerca de la respuesta del acero mencionado a los tratamientos de térmicos de temple y revenido. Sin embargo, la mayor parte de dicha información ha sido producida bajo condiciones controladas en ambiente de laboratorio [1]-[4], lo que en ocasiones ha conllevado a que los parámetros recomendados no conduzcan a las propiedades esperadas cuando son aplicados a procesos de tratamiento térmico a escala industrial.

En el presente trabajo se realizó un experimento del tipo “mover un factor a la vez”[5] para evaluar diferentes combinaciones de temperatura y tiempo para tratamientos térmicos de temple y revenido para el acero AISI-SAE 1045 a escala industrial. La evaluación se realizó con base en el análisis de la microestructura y dureza obtenidas en cada tratamiento térmico.

II. PROCEDIMIENTO EXPERIMENTAL

A. MATERIALES

Se utilizó un redondo de 1,5" de diámetro de acero AISI/SAE1045 laminado en caliente, en estado de entrega, a partir del cual se cortaron con sierra industrial probetas de 1,5" de longitud (ver Figura 1).

B. TRATAMIENTOS TÉRMICOS

¹ Ingeniero mecánico, MsC ingeniería mecánica, Grupo de Investigación: PROCESOS METALMECANICOS ECOEFICIENTES

² Ingeniero de materiales, Grupo de Investigación: PROCESOS METALMECANICOS ECOEFICIENTES

Los tratamientos térmicos evaluados se realizaron en la planta de tratamientos térmicos de la compañía Forjas Bolívar S.A. la cual está compuesta por dos hornos verticales (uno para austenización y otro para revenido ambos con capacidad para 400kg de carga) aptos para procesos bajo atmósfera controlada, una cámara generadora de endogas⁴ y un tanque para medios de temple con capacidad de 3500 litros. Para este trabajo el medio de temple usado fue aceite mineral (ver propiedades del aceite en la Tabla 1) a 45°C.

PROPIEDAD	UNIDAD	VALOR	MÉTODO
VISCOSIDAD	CSt- 40°C	26,03	ASTM D455
DENSIDAD	g/ml	0,86	ASTM D1298
INDICE VISCOSIDAD	N.A	104	ASTM D2270

Tabla 1 Propiedades físicas del aceite usado como medio de temple

Para el tratamiento térmico de temple se evaluaron tres temperaturas de austenización: 820°C, 870°C y 930°C, elegidas de acuerdo con los rangos recomendados por diferentes proveedores locales de acero AISI/SAE 1045⁵. El tratamiento de revenido se llevó a cabo a 150°C, 400°C y 630°C, con tiempos de sostenimiento de 1 y 3 horas⁶.

C. ANALISIS MICROESTRUCTURAL

Se llevaron a cabo mediciones de difracción de rayos X (XRD) para identificar las fases presentes y evaluar la tetragonalidad de la martensita en cada una de las muestras estudiadas. Las mediciones se llevaron a cabo a temperatura ambiente usando un difractómetro PANalytical X'Pert PRO MPD, variando el ángulo 2θ entre 20° y 120° usando radiación Cu- α ($\lambda=0.1542\text{nm}$). En algunas muestras seleccionadas se llevo a cabo un análisis metalográfico para complementar los resultados obtenidos en las pruebas de XRD.

D. MEDICIONES DE DUREZA

Se realizaron seis mediciones de dureza Rocwell C (HRC) en diferentes posiciones de una de las caras planas de cada probeta (ver Figura 1). Adicionalmente, se llevaron a cabo barridos de microdureza para determinar la distribución de durezas en la sección transversal de las muestras, las cuales para este ensayo, fueron cortadas por hilo (EDM) para minimizar la posibilidad de inducir transformaciones de fase por el calor producido durante el proceso de corte.



Figura 1 Probetas usadas en el estudio (der) y esquema de las posiciones usadas para la medición de dureza en la cara plana de las probetas (izq).

III. RESULTADOS Y DISCUSIÓN

A. DIFRACCIÓN DE RAYOS X

Cada uno de los difractogramas obtenidos fue tratado con el paquete PowderX⁷ para suprimir el ruido de fondo (background) así como para determinar la posición de cada pico y el cálculo de la distancia interplanar d necesaria para determinar los parámetros de red a y c de la martensita con los cuales se evaluó su tetragonalidad [6][7] usando las ecuaciones reportadas en la literatura para tal fin [8][9].

En la Figura 2 se presentan los difractogramas correspondientes a las muestras templadas desde las temperaturas de austenización seleccionadas, en ella se identificaron los picos correspondientes a martensita (α') y austenita retenida, los cuales coinciden con la información disponible en la literatura [10][14]. Se puede observar en dicha figura la presencia de austenita retenida en las tres muestras; sin embargo, su presencia, estimada por la relación de alturas entre los picos cada una de las fases, es menor en la probeta austenizada a 870°C.

En la Tabla 2 se presentan los parámetros de red a y c obtenidos para las muestras sometidas a tratamiento de temple desde diferentes temperaturas de austenización, con su correspondiente relación c/a . Estos resultados muestran que la martensita con mayor tetragonalidad, evaluada ésta mediante el valor de c/a , es la de la muestra austenizada a 870°C, lo que podría explicarse por el menor contenido de austenita retenida detectado en los difractogramas de la Figura 2. Adicionalmente, se llevó a cabo el cálculo el valor ideal de c/a de acuerdo con las ecuaciones del modelo teórico planteado por Rammo y Abdulah para aceros al carbono[7]; de igual manera se realizó este cálculo usando el modelo experimental presentado en el trabajo mencionado. Los resultados de dichos cálculos arrojaron valores de c/a iguales a 1,0201 y 1,0193 \pm 0,005 muestran un ajuste razonable con los datos obtenidos en el presente estudio si se tiene en cuenta que el modelo teórico fue desarrollado contemplando sólo hierro y carbono como componentes de la aleación[7].

⁴ El endogás es un medio protector con altos contenidos de H₂ y CO que se produce a partir de la conversión de propano o metano y aire

⁵ Los proveedores de aceros que se tuvieron en cuenta para esta selección fueron Diaco, Compañía General de Aceros, Bohler y Ferrocortes

⁶ La elección de las temperaturas y tiempos de sostenimiento para los tratamientos de revenido se hizo con base en las prácticas de Forjas Bolívar, compañía para la que se llevó a cabo este trabajo.

⁷ PowderX for Windows by Cheng Dong (Institute of Physics, Chinese Academy of Sciences, P.O.Box 603, Beijing 100080, P.R. China. E-mail: chengdong@aphy.iphy.ac.cn)

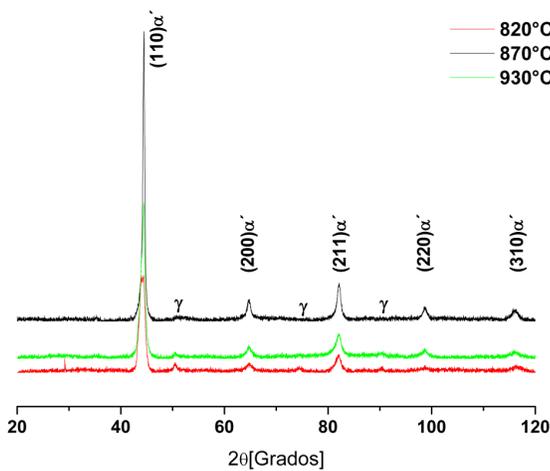


Figura 2 Difractogramas de las muestras templadas desde diferentes temperaturas de austenización en los que se identifican los picos correspondientes a martensita (α') y austenita retenida(γ)

Es importante anotar que tanto el modelo mencionado como otros valores de c/a reportados en la literatura [6] sólo relacionan la tetragonalidad de la martensita con el contenido de carbono. Sin embargo, los datos de la Tabla 2 sugieren que podría existir una relación entre la temperatura de austenización previa al temple y los valores de los parámetros de red de la martensita obtenida. No obstante, dado que el experimento realizado en este trabajo fue del tipo “mover un factor a la vez”, se requerirá un estudio detallado con un tratamiento estadístico más adecuado que permita confirmar o refutar esta hipótesis.

TEMPERATURA DE AUSTENIZACIÓN (°C)	a(Å)	c(Å)	c/a
930	2,861	2,876	1,006
870	2,838	2,880	1,015
820	2,853	2,879	1,009

Tabla 2 Parámetros de red para las muestras templadas desde diferentes temperaturas de austenización

Con base en los resultados obtenidos hasta este punto se decidió llevar a cabo los tratamientos de revenido sobre muestras templadas desde una temperatura de austenización de 870°C. Para las muestras revenidas los resultados del análisis de XRD sólo revelaron picos correspondientes a martensita (ver Figura 3); al igual que para las muestras templadas, se realizó el cálculo de los parámetros de red de la celda unitaria para evaluar la tetragonalidad de la martensita; en los resultados, que se muestran en la Tabla 3, se puede observar (como se esperaba) que para cada temperatura de revenido, la tetragonalidad de la martensita disminuye a medida que se aumenta el tiempo de sostenimiento sin que se evidenciara un patrón en los valores obtenidos de a/c con respecto a la temperatura de revenido para un mismo tiempo de sostenimiento.

TRATAMIENTO TÉRMICO	a(Å)	c(Å)	c/a
Solo Temple	2,838	2,880	1,015
Temple + revenido a 150°C, 1h	2,845	2,878	1,012
Temple + revenido a 150°C, 3h	2,851	2,876	1,009
Temple + revenido a 400°C, 1h	2,858	2,875	1,006
Temple + revenido a 400°C, 3h	2,859	2,874	1,005
Temple + revenido a 630°C, 1h	2,851	2,876	1,009
Temple + revenido a 630°C, 3h	2,858	2,875	1,006

Tabla 3 Parámetros de red para las muestras templadas desde 870°C y sometidas a diferentes combinaciones de temperatura y tiempo de revenido.

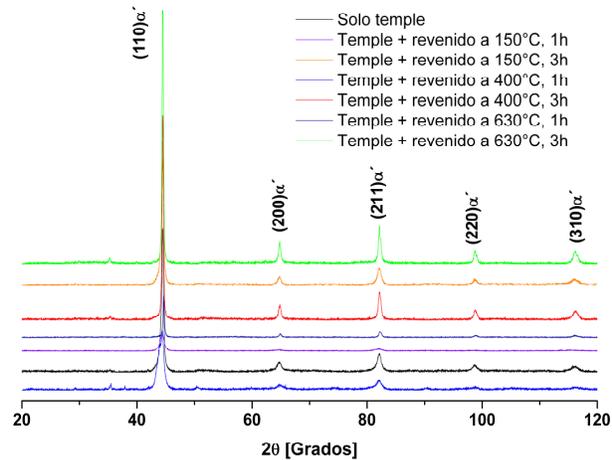


Figura 3 Difractogramas para las muestras templadas desde 870°C y sometidas a diferentes combinaciones de temperatura y tiempo de revenido en los que se identifican los picos correspondientes a martensita (α')

B. MEDICIONES DUREZA Y MICRODUREZA

Los valores de dureza obtenidos en las muestras templadas desde diferentes temperaturas de austenización (Tabla 4) se encuentran dentro del rango de dureza máxima para 99.9% de martensita en aceros con 0,45% en peso de carbono, el cual de acuerdo con la información reportada en la literatura, se encuentra entre 55 y 64HRC [3][4]. Desde este punto de vista se podría decir que el resultado obtenido es satisfactorio independientemente de la temperatura de austenización utilizada.

De acuerdo con lo expuesto en el análisis de los resultados de XRD sólo se presentan las mediciones de dureza realizadas en a las probetas templadas desde 870°C sometidas a tratamiento de revenido (ver Tabla 5), para las cuales se muestran además los valores de dureza calculados de forma teórica usando el método expuesto en [15]. Se puede observar en la Tabla 5 que los valores calculados de forma teórica siguen la misma tendencia que los resultados experimentales. Sin embargo, en algunos casos (e.g. la muestra revenida a 400°C durante 1 hora) la diferencia entre ambos valores es considerable, lo que lleva a pensar que el método teórico pueden servir como una primera aproximación para determinar las condiciones de tratamiento térmico (i.e. temple y revenido en el caso de este trabajo) para un acero particular teniendo en cuenta que a escala industrial se deberán

realizar pruebas para poner a punto las variables de tratamiento térmico (i.e temperatura y tiempo de sostenimiento para el revenido) para garantizar que el material adquiera las propiedades requeridas.

TEMPERATURA DE AUSTENIZACIÓN (°C)	DUREZA (HRC)
930	64,8
870	59,0
820	63,9

Tabla 4 Durezas obtenidas en las muestras templadas desde diferentes temperaturas de austenización

TRATAMIENTO TÉRMICO	DUREZA (HRC)	
	Experimental	Teórica
Solo Temple	59,8	55-64
Temple + revenido a 150°C, 1h	64,9	55-64
Temple + revenido a 150°C, 3h	61,4	55-64
Temple + revenido a 400°C, 1h	63,5	42,8
Temple + revenido a 400°C, 3h	45,0	42
Temple + revenido a 630°C, 1h	26,4	22
Temple + revenido a 630°C, 3h	21,4	19,3

Tabla 5 Parámetros de red para las muestras templadas desde 870°C y sometidas a diferentes combinaciones de temperatura y tiempo de revenido

Como se mencionó en la sección de procedimiento experimental, también se realizaron mediciones de microdureza para evaluar la distribución de la dureza en la sección transversal de las probetas, estos resultados (Figura 4 y Figura 5) muestran que la probeta templada presenta el 50% de martensita a una profundidad aproximada de 400µm. Este resultado contrasta con el perfil de dureza reportado en [3] y [4] para una probeta de 1" templada en aceite de la que se esperaría mayor templabilidad que la de los redondos de 1,5" usados en este estudio. Lo anterior podría deberse a que el potencial de carbono del gas usado para evitar que se presentara descarburación durante la austenización es de 0.5% en peso de carbono, el cual es ligeramente mayor al de las probetas y puede inducir un enriquecimiento de carbono en éstas, el cual explicaría el incremento de dureza. Adicionalmente, es importante resaltar que este horno se usa para procesos de cementación y es limpiado mensualmente de tal manera que el carbono adherido a las paredes del mismo también puede ser una fuente no controlada de aumento del potencial de carbono en la atmósfera del equipo.

IV. CONCLUSIONES

Los resultados obtenidos en este trabajo sugieren que en condiciones industriales la temperatura recomendada para austenización del acero AISI/SAE1045 es 870°C, dado que al templar el acero desde dicha temperatura se obtiene una dureza superficial satisfactoria (dentro del rango de dureza máxima para un acero al carbono con 0,45% en peso de

carbono) con la menor cantidad de austenita retenida y la mayor tetragonalidad de la martensita producida.

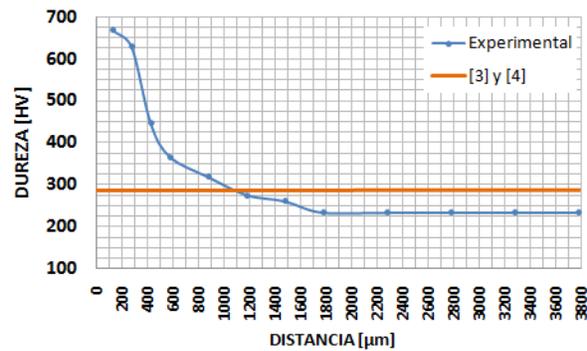


Figura 4 Perfiles de dureza de piezas templadas desde 870°C

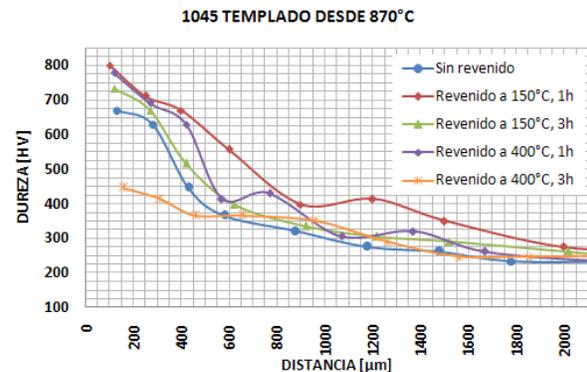


Figura 5 Perfiles de microdureza de piezas templadas desde 870°C y sometidas a diferentes combinaciones de temperatura y tiempo de revenido.

Finalmente, los resultados obtenidos sugieren que puede existir una relación entre la temperatura de austenización y la tetragonalidad de la martensita obtenida al templar aceros simples al carbono, como el AISI/SAE 1045, lo cual no se discute en la literatura consultada en este trabajo. Sin embargo, la confirmación de esta hipótesis requerirá de trabajo adicional con un manejo estadístico adecuado que sobrepasa el alcance de este trabajo.

AGRADECIMIENTOS

Este trabajo fue financiado con fondos de COLCIENCIAS y el SENA como parte de del proyecto 3324-454-22115 (contrato 438-2009). Los autores también agradecen a Forjas Bolívar S.A. por el apoyo técnico recibido y la información suministrada.

REFERENCIAS.

- [1] G. E. Totten, *Steel heat treatment handbook*, 2nd ed., Boca Raton: CRC, 2006, p 2-598.
- [2] W. D. Callister, *Materials science and engineering an introduction*, 7th ed., New York: Wiley, 2007.

- [3] G. Krauss, *Steels processing, structure and performance*, 1st ed., Materials Park: ASM, 2005.
- [4] A. Valencia, *Tecnología del tratamiento térmico de los metales*, 2^a ed., Medellín: Universidad de Antioquia, 2009.
- [5] H. Gutiérrez, R. de la Vara, *Análisis y diseño de experimentos*, 1^a ed., Mexico: Mc Graw Hill, 2003.
- [6] G. Totten, M. Howes, T. Inoue, *Handbook of residual stress and deformation of steel*, Materials Park: ASM, 2002.
- [7] N.N. Rammo, O.G. Abdulah, “A model for the prediction of lattice parameters of iron-carbon austenite and martensite”, *Journal of alloys and compounds*, 420, 117–120, 2006.
- [8] B. D. Cullity, *Elements of X-Ray diffraction*, 1st ed., Reading: Addison-Wesley, 1956.
- [9] B. E. Warren, *X-Ray diffraction*, 1st ed., Mineola: Dover, 1990.
- [10] J.J. Hoyos, A.A. Ghilarducci, H.R. Salva, C.A. Chaves, J.M. Vélez, “Internal friction in martensitic carbon steels”, *Materials science and engineering A*, 521–522, 347–350, 2009.
- [11] M. H. Shaeri, H. Saghafian, S. G. Shabestari, “Effects of austempering and martempering processes on amount of retained austenite in Cr-Mo Steels (FMU-226) used in mill liner”, *Journal of iron and steel research, international*, 17, 53-58, 2010.
- [12] M.R. Berrahmoune, S. Berveiller, K. Inal, A. Moulin, E. Patoor, “Analysis of the martensitic transformation at various scales in TRIP steel”, *Materials science and engineering A*, 378, 304–307, 2004.
- [13] J. Pesicka, R. Kuzel, A. Dronhofer, G. Eggeler, “The evolution of dislocation density during heat treatment and creep of tempered martensite ferritic steels”, *Acta materialia* 51, 4847–4862, 2003.
- [14] A. Munitz, G. Kimmel, J. C. Rawers, R. J. Fiikls, “Ball milling induced bct phase formation in iron and iron alloys”, *Nanostructured materials*, 8, 867-877, 1997.
- [15] H. Sierra, “Aceros de construcción mecánica de herramientas e inoxidable y pautas para su elección”, Universidad Nacional de Colombia, Medellín, reporte de investigación, 2002.