


Estudio de las transiciones de fase inducidas por tratamiento térmico de temple y revenido en el acero 1045

 Alejandro Trujillo ^{*1}, Rosalba Guerrero² y Jorge Bravo ¹

¹ Universidad Nacional Mayor de San Marcos, Lima, Perú

² Universidad de Piura, Piura, Perú.

Recibido 15 Mar 2023 – Aceptado 29 May 2023 – Publicado 01 Ago 2023

Resumen

En el presente trabajo reportamos la caracterización de una muestra de acero 1045 en estado de suministro y cuando es sometida a los tratamientos térmicos de temple en agua y temple y revenido, para estudiar las transiciones de fase que se suscitan. Las técnicas empleadas fueron la microscopía óptica, la espectroscopía Mössbauer por dispersión y la fluorescencia de rayos X dispersiva en energía. Las micrografías de la muestra en estado de suministro, identificada como “acero-ST” dan cuenta de la presencia de ferrita y perlita; las micrografías de la muestra en estado de temple en agua, identificada como “acero-agua” presentan martensita y las micrografías de la muestra en estado de bonificado, es decir, sometida al tratamiento de temple en agua y revenido, denominada “acero-agua R”, ponen en evidencia la presencia de la denominada martensita revenida. Así mismo se llevaron a cabo las medidas de dureza obteniéndose 219 HB, 634 HB y 525 HB para las muestras acero-ST, acero-agua y acero-agua R respectivamente. El espectro Mössbauer de la muestra acero-ST presenta dos sextetos asociados a la ferrita y a la perlita; el espectro Mössbauer de la muestra acero-agua da cuenta de tres sextetos magnéticos adjudicados a los sitios de hierro presentes en la martensita y que son los vecinos del átomo de carbono. El espectro Mössbauer correspondiente a la muestra acero-agua R presenta tres sextetos magnéticos asociados a la martensita revenida. Además del hierro, los espectros de Fluorescencia de rayos X de las muestras en estudio dan cuenta de la presencia de manganeso, cobre y cromo. Se espera que los resultados obtenidos proporcionen mayor información acerca de las fases involucradas en las transiciones de fase inducidas por los tratamientos térmicos antes mencionados en el acero 1045 y que se inicien acercamientos de cooperación entre el sector industrial y el ámbito académico.

Palabras clave: Microscopía óptica, espectroscopía Mössbauer, fluorescencia de rayos X, martensita.

* atrujilloq@unmsm.edu.pe

© Los autores. Este es un artículo de acceso abierto, distribuido bajo los términos de la licencia Creative Commons Atribución 4.0 Internacional (CC BY 4.0) que permite el uso, distribución y reproducción en cualquier medio, siempre que la obra original sea debidamente citada de su fuente original.



Study of phase transitions induced by quenching and tempering heat treatment in 1045 steel

Abstract

In this work we report the characterization of a sample of steel 1045 subjected to the thermal treatment of quenching in water and quenching and tempering. The sample was made available by the Böhler, Company, Peru. Taking as reference the results of this characterization, the phase transformations that take place when a sample is subjected to the above mentioned treatments, are studied. The applied techniques were optical microscopy, dispersive Mössbauer spectroscopy and X ray fluorescence. The images by optical microscopy of the sample in its as received state, as “acero-ST”, reveals the presence of ferrite and perlite. The image of the sample quenched in water identified as ‘acero-agua’ reveals the presence of martensite; and the sample in the quenching and tempering state, denominated “acero-agua R” reveals the presence of the denominated tempered martensite. In addition, the measurements of hardness were carried out obtaining 219 HB, 634 HB and 525 HB for the samples acero-ST, acero-agua and acero-agua R respectively. The Mössbauer spectrum of the “acero-ST” sample exhibits two sextets associated to ferrite and perlite. The Mössbauer spectrum for the sample “acero-agua” exhibits the presence of three magnetic sextets assigned to iron sites present in martensite, that are occupied by the first three neighbors of each carbon atom. The Mössbauer spectrum that corresponds to the “acero-agua R” shows three magnetic sextets associated to annealed martensite. In addition to iron, the X-ray fluorescence spectra of the samples under study show the presence of manganese, copper and chromium. We pretend that these obtained results will contribute to a better knowledge of the phase transformations that take place in Steel 1045 in the tempered in water and normalized states. Moreover, we look forward for better cooperation ties between the industrial and the academic sectors.

Keywords: Optical microscopy, Mössbauer spectroscopy, X ray fluorescence, martensite.

Introducción

El estudio detallado de los materiales nos permite entender en esencia sus propiedades y evaluar sus potenciales aplicaciones en diversos aspectos del quehacer humano. Este estudio se puede llevar a cabo desde una mera caracterización hasta la evaluación de los cambios estructurales y de las propiedades ante la aplicación de determinados procedimientos. Los materiales más utilizados en el mundo de la construcción son los metales; se encuentran en la naturaleza formando compuestos en forma de óxidos, carbonatos, sulfuros y fosfatos; y se extraen de estos eliminando las impurezas [1]. Dentro del grupo de los metales, se encuentran los aceros, que constituyen aleaciones a base de hierro, de los cuales, los más comunes son los aceros al carbono, con un contenido de carbono de hasta 1,5% [2]. En la actualidad, el acero, debido a su resistencia, conformabilidad, abundancia y bajo costo, es el principal material utilizado para aplicaciones estructurales [3].

En el Perú existen diversas entidades que ofertan aceros de buena calidad para múltiples propósitos y al ser el acero uno de los materiales más usados por el ser humano, la Facultad de Ciencias Físicas de la Universidad Nacional Mayor de San Marcos (FCF-UNMSM) ha tomado la iniciativa de vincularse con el sector productivo de la metalurgia mediante proyectos de investigación desde fines de la década de 1990, año en el que se llevó a cabo un proyecto piloto sobre la caracterización de ace-

ros industriales por espectroscopía Mössbauer por dispersión (EMD), con financiamiento del Consejo Superior de Investigación de esta casa de estudios. Asimismo, entre los años 1976-1977 se realizaron estudios sobre austenita retenida en aceros martensíticos proporcionados por la empresa MEPSA utilizando la técnica de difracción de rayos X (DRX).

En trabajos no convencionales sobre metalurgia, y particularmente sobre aceros, realizados en diferentes partes del mundo, se han utilizado técnicas analíticas, como la espectroscopía Mössbauer, la cual ha demostrado ser una herramienta analítica sofisticada para estudiar los materiales multifásicos que se encuentran comúnmente en los campos de la metalurgia y la ciencia e ingeniería de materiales [4].

En el presente trabajo nos avocamos al estudio del acero 1045, acero con 0,45% de carbono proporcionado por la empresa Böhler. Este tipo de acero se utiliza para la fabricación de partes de maquinaria y repuestos sometidos a esfuerzos normales, árboles de transmisión, ejes, pernos, tuercas, ganchos, pines de sujeción, pasadores, cuñas, chavetas, etc. También para herramientas de mano, portamatrices, etc. [5].

Investigamos las transiciones de fase inducidas en estos materiales en estado temple en agua y bonificado (temple seguido de revenido). Para tal fin utilizamos las técnicas de MO, EMD [6–8] y Fluorescencia de rayos X (FRX) [9,10]. Así mismo, registramos las medidas de dureza.

Se espera que el presente trabajo pueda contribuir a expandir nuestro conocimiento de la estructura del acero 1045 a nivel atómico y nuclear, y establecer un acercamiento al trabajo interdisciplinario entre las ciencias básicas y el sector industrial.

Material y Métodos

Se adquirió a través de la empresa de aceros Bhöler-Perú una barra cilíndrica de acero 1045 de $\frac{3}{4}$ de pulgada de diámetro y 15 cm de longitud. Esta barra fue cortada, perpendicularmente a su eje, para obtener tres testigos cilíndricos de 5 cm de longitud. Uno de los tres cilindros fue sometido al tratamiento térmico de temple, el otro fue sometido al tratamiento térmico de temple y revenido, y el tercer cilindro, que servirá como referencia, no fue sometido a ningún tratamiento térmico. Para el tratamiento de temple las muestras se llevaron directamente a temperatura de austenización a 840°C; dado que, cuando las piezas son de poco grosor (diámetros menores de 200 mm) y de forma sencilla, se pueden introducir directamente en los hornos con temperatura alta, por encima de 700°C [11]. Inmediatamente después fueron enfriadas bruscamente en agua con agitación. El tiempo de permanencia a la temperatura de austenización fue de 45 minutos.

Para el procedimiento de revenido, después que la muestra ha sido templada en agua, se lleva a una temperatura de 300°C (temperatura recomendada en la ficha técnica de Böhler para este acero, la cual equivale a un revenido bajo) para luego ser enfriada bruscamente en aceite con agitación. Para el tratamiento térmico de temple se utilizó el horno marca M & T Forni Industrial SRL, Año 1987 con temperatura máxima de 1350°C; para el revenido se usó el horno marca M & T Forni Industrial SRL, Año: 1987, Modelo: FM 30, con temperatura máxima de 1700°C.

Cada uno de los testigos cilíndricos que fueron sometidos a los tratamientos térmicos antes mencionados fueron cortadas perpendicularmente a sus respectivos ejes para obtener, en cada caso, dos cilindros de 2,5 cm de longitud, teniendo ahora dos testigos cilíndricos de 2,5 cm de longitud en estado de temple en agua y dos testigos cilíndricos de 2,5 cm de longitud en estado bonificado (sometidos al tratamiento térmico de temple y revenido). En la figura 1 se representa esquemáticamente como se obtuvieron los testigos mencionados.

Para efectuar los cortes se utilizó una electroerosionadora marca Intertech Worldwide Corporation modelo 320 CZT, serie 113518.

Los hornos utilizados para los tratamientos térmicos y la electroerosionadora utilizada para los cortes, pertenecen al Laboratorio de Metalotecnía de la Facultad de Ingeniería, Departamento de Ingeniería Mecánico-Eléctrica de la Universidad de Piura (LM-IME-UDEP).

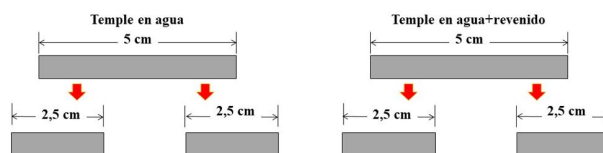


Figura 1: Representación esquemática de la obtención de los testigos cilíndricos de 2,5 cm de longitud a partir de los dos testigos cilíndricos de 5 cm de longitud, uno en estado de temple en agua y el otro en estado bonificado (templado en agua y revenido).

Una de las caras de las muestras cilíndricas templadas en agua fue estudiada por MO, mientras que la otra cara fue utilizada para medir la dureza. El mismo procedimiento se llevó a cabo para las muestras templadas en agua y revenidas (bonificadas). Las superficies elegidas para realizar los estudios de MO y dureza en ambos casos fueron las superficies develadas en el proceso de corte como se indica en la figura 2.

De las superficies utilizadas para realizar los estudios de MO se extrajeron muestras en forma de disco de 2 mm de grosor, como se indica en la figura 3, para ser analizadas por FRX y EMD.

El cilindro restante que no fue sometido a tratamiento térmico (estado de suministro), fue cortado para obtener dos cilindros de 2,5 cm de longitud a los cuales se les realizó el mismo procedimiento que se les aplicó a las muestras en estado de temple y bonificado para la obtención de las muestras que serán analizadas por MO, FRX y EMD. La representación esquemática del proceso de obtención de las muestras se presenta en la figura 4.

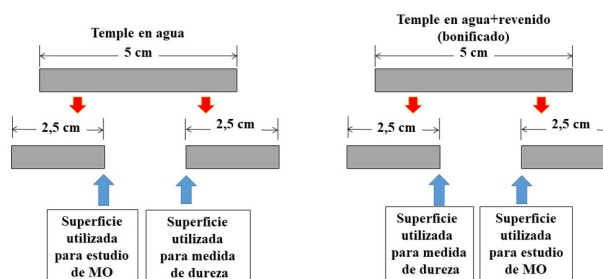


Figura 2: Representación esquemática de la obtención de los testigos cilíndricos de 2,5 cm de longitud a partir de los dos testigos cilíndricos de 5 cm de longitud, uno en estado de temple en agua y el otro en estado bonificado (templado en agua y revenido), donde se indican las superficies elegidas para los estudios de MO y de dureza.

Para los exámenes por MO, las muestras se prepararon aplicando en la superficie a estudiar un desbaste y pulido, con el propósito de alcanzar un acabado especular que permita una adecuada observación microestructural del material evitando la visualización de eventuales marcas ocasionadas durante el corte y otros procesos previos. El desbaste consiste en frotar la superficie de la muestra

en estudio, que en este caso sería la base del testigo cilíndrico de 2,5 cm de longitud sobre una sucesión de lijas, desde las más gruesa -N° 80- hasta la más fina-N° 800-; el número de la lija es inversamente proporcional al tamaño de la partícula abrasiva.

Inmediatamente después de cada etapa del desbaste, la superficie a estudiar se lava con agua, se enjuaga con alcohol y se seca en una corriente de aire caliente. Una vez concluido el desbaste, se inicia la etapa de pulido, utilizando como abrasivo una suspensión de polvo de diamante en aceite con partículas de 3 y 1 μm , respectivamente. Al visualizar las muestras en el microscopio después del pulido de 1 μm y de la respectiva limpieza, deben haber desaparecido las rayas finas ocasionadas por el desbaste, apreciándose solamente las inclusiones u otros defectos que presente el material o pieza. Esta observación previa de la muestra, antes del ataque con el reactivo para revelar la microestructura, es muy importante para una correcta interpretación e identificación de las fases que constituyen la microestructura granular.

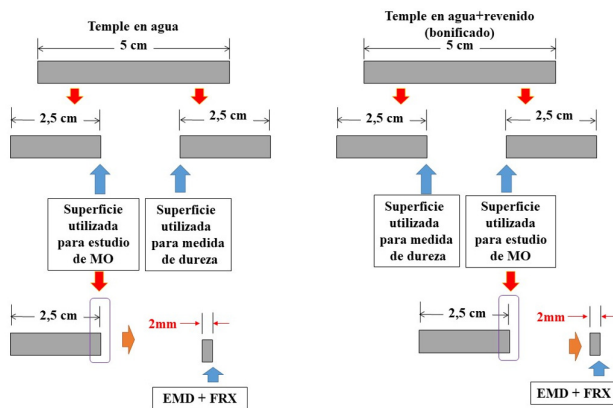


Figura 3: Representación esquemática de la obtención de los testigos cilíndricos de 2,5 cm de longitud a partir de los dos testigos cilíndricos de 5 cm de longitud, uno en estado de temple en agua y el otro en estado bonificado (templado en agua y revenido), donde se indica cómo se obtuvieron las muestras y las correspondientes superficies elegidas para los análisis de EMD y FRX.

Para el acero, materia de estudio, el reactivo utilizado para revelar la microestructura fue NITAL al 2 %, el cual se obtiene diluyendo 2 mL de ácido nítrico en 98 mL de alcohol etílico. El procedimiento de ataque es por inmersión, sumergiendo la superficie pulida de la muestra en la solución alcohólica durante 3 a 5 segundos. Luego la probeta se lava con agua, se enjuaga con alcohol y se seca en la corriente de aire caliente de un secador.

La evaluación microestructural de las muestras se realizó en el LM-IME-UDEP utilizando un microscopio UNITRON U.S.A., modelo MEC3 con sistema óptico UNITRON NIS LWD con cámara digital CMOS a co-

lor de 5 megapíxeles y software Infinity Analyze 6,5. La observación de la microestructura se realizó en la sección transversal desde el borde hasta el centro de la pieza. Este microscopio está equipado para visualizar muestras metálicas. Estas secciones transversales fueron utilizadas para los análisis de EMD y FRX.

Los registros de dureza también se llevaron a cabo en LM-IME-UDEP utilizando un durómetro Officine Galileo A200 en escalas Rockwell C (HRC) y Brinell (HB). Para la probeta en estado de suministro se utilizó la escala Brinell (HB) y para las probetas en estado de temple en agua, y bonificado, se utilizó la escala Rockwell C (HRC). Las medidas se realizaron en 5 puntos de la sección transversal de las muestras.

Las medidas por espectroscopia Mössbauer se realizaron a temperatura ambiente (TA) utilizando el espectrómetro Mössbauer del Laboratorio de Arqueometría de la FCF-UNMSM, las medidas se llevaron a cabo en geometría de dispersión con una fuente radiactiva de ^{57}Co en una matriz de rhodio con una actividad estimada de 5 mCi moviéndose con aceleración sinusoidal. Los parámetros Mössbauer: corrimiento isomérico (δ), campo magnético hiperfino (B_{hf}), desdoblamiento cuadrupolar (ΔE_Q), corrimiento cuadrupolar (2ϵ) y área de absorción (A), en diferentes sitios de hierro se obtuvieron ajustando los espectros Mössbauer con el programa Normos que utiliza la técnica de regresión multiparamétrica no lineal [12].

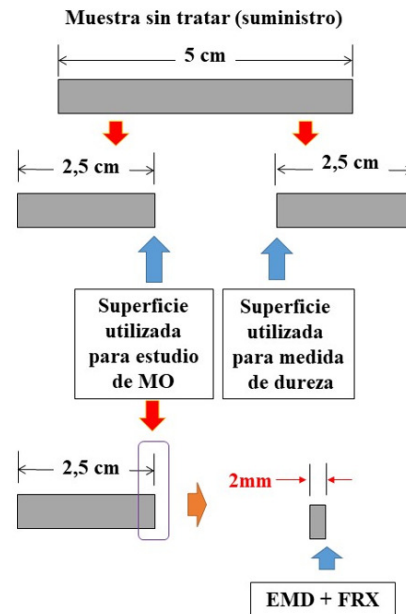


Figura 4: Representación esquemática de la obtención de los testigos cilíndricos de 2,5 cm de longitud a partir del testigo en estado de suministro, donde se indica cómo se obtuvieron las muestras y las correspondientes superficies elegidas para los análisis de EMD y FRX.

Para las medidas por FRX se utilizó un equipo portátil de espectrometría de FRX dispersiva en energía marca Amptek con ánodo de oro del Laboratorio de Arqueometría de la FCF-UNMSM. El equipo operó a un voltaje de 30 kV y una corriente de 15 μ A. La irradiación se llevó a cabo con ángulos de incidencia y salida de alrededor de 45°, distancia muestra a fuente de rayos-X de 4 cm y distancia de muestra a detector de 2 cm aproximadamente. El voltaje de operación y la corriente aplicada se regulan de manera que la tasa de conteo no supere 3000 cts/s.

El análisis elemental de la muestra se hace primero de manera cualitativa; para esto se identifican los elementos presentes en los espectros de FRX, determinando la posición correcta de cada pico. La conversión de canales a energías asociadas a las posiciones de los picos, se llevó a cabo mediante la curva de calibración de energía. Se procesó la muestra de referencia certificada denominada “Suelo de San Joaquín” adquirida de la National Institute of Standards and Technology (NIST). A partir del espectro de FRX obtenido de esta muestra se eligieron diferentes elementos de referencia con líneas de energía conocidas K_{α} y/o K_{β} para cubrir la región de interés en energía de 1 a 15 keV. La relación energía-canal fue determinada utilizando el método de ajuste de mínimos cuadrados obteniéndose la siguiente expresión:

$$E \text{ (keV)} = A + BX$$

donde $A = -0.00406233$; $B = 0,0206363$ (keV/canales); $X = \text{número de canales}$

Esta relación se utiliza para identificar los elementos desconocidos presentes en los espectros utilizando la base de datos de energías de líneas de rayos X característicos de todos los elementos.

Para el análisis cuantitativo se utiliza un programa que se basa en el método de parámetros fundamentales y simula todo el arreglo experimental incluyendo: composición elemental de la muestra, geometría experimental, distribución espectral de los rayos X que emite la fuente y su interacción con la muestra y el proceso de detección. En esta etapa se puede identificar la presencia de picos de rayos X característicos que pudieron haber pasado inadvertidos en la parte cualitativa por superponerse a picos más intensos. Este programa se calibra usando la muestra de referencia certificada denominada “Suelo de San Joaquín” mencionada anteriormente.

Resultados y Discusión

Las figuras 5a, 5b y 5c muestran las imágenes por MO de la muestra acero-ST (estado suministro) a 100X, 500X y 1000X respectivamente. En todas ellas se identifica una microestructura fina de granos equiáxicos correspondientes a las fases ferrita (color blanco) y perlita (color oscuro). Las micrografías 5b y 5c a 500X y 1000X, respectivamente, muestran colonias de perlita fina; no se

evidencian con claridad las láminas alternas de ferrita y cementita que la constituyen, lo cual es típico de los aceros ferrito-perlíticos en estado de normalizado.

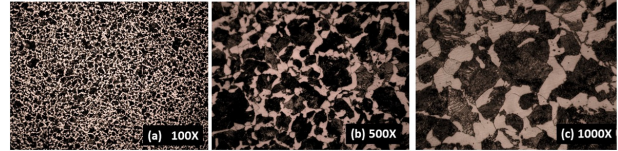


Figura 5: (a) Micrografía de la muestra de acero 1045 en estado de suministro a 100X. (b) Micrografía de acero 1045 en estado de suministro a 500X. (c) Micrografía de acero 1045 en estado de suministro a 1000X.

En las figuras 6a, 6b y 6c se presentan las imágenes por MO registradas en la parte central de la muestra “acero-agua” (estado: temple en agua) a 100X, 500X y 1000 X, respectivamente. La figura 6d presenta la micrografía a 500 X registrada cerca del borde de la muestra. Las micrografías en mención dan cuenta de una microestructura martensítica típica de un acero templado en agua, homogénea tanto en el borde como en el centro de la pieza. Las agujas de martensita se observan gruesas, como es de esperar en un acero de este contenido en carbono (0,45 %C), y de las mismas características tanto en el borde como en el centro; es decir, se ha logrado un temple homogéneo en toda la sección de la barra templada, como se evidencia en las micrografías.

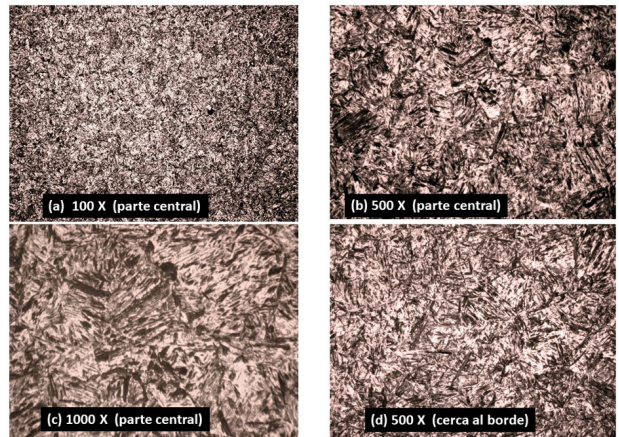


Figura 6: Micrografías de acero 1045: (a) Microestructura martensítica parte central en estado temple en agua a 100X. (b) Parte central en estado temple en agua a 500X. Microestructura martensítica. agujas de martensita. (c) Parte central en estado de temple en agua a 1000X. Microestructura martensítica. Se observan agujas gruesas de martensita. (d) Cerca del borde en estado de temple en agua a 500X. Microestructura martensítica. Agujas de martensita.

En las figuras 7a, 7b y 7c se presentan las micrografías registradas cerca del borde de la muestra “acero-agua

R" (estado bonificado) a 200X, 500X y 1000X, respectivamente, y en la figura 7d la micrografía registrada en la parte central a 1000 X de esta misma muestra. Se aprecia una microestructura típica de martensita revenida. Al igual que en la muestra templada, se ha obtenido una microestructura homogénea tanto en el borde como en el centro de la pieza, constituida por agujas finas de martensita revenida, como se muestra en la figura 7a. En la figura 7b se muestra una mayor ampliación para las agujas de martensita revenida en el borde de la muestra. En el microscopio óptico no se identifican otras fases, pero es previsible la presencia de agujas de bainita inferior que suelen aparecer en los revenidos a 300°C, como es en este caso, como consecuencia de la transformación de austenita residual. En las figuras 7c y 7d se muestran a mayor ampliación la presencia de algunas fases aciculares que podrían evidenciar la presencia de algunas agujas de bainita. Las medidas promedio de dureza corresponden a lo esperado para este acero después de un revenido bajo (300°C).

Se midió la dureza del acero en estado de suministro y después de cada tratamiento térmico; las medidas se realizaron en la sección transversal de las muestras, tal como se indica en la figura 8. Para la probeta en estado de suministro se utilizó la escala Brinell (HB), registrándose las medidas en 5 puntos; para las probetas en estado de temple en agua y bonificado, se utilizó la escala Rockwell C (HRC). Posteriormente las medidas de dureza fueron expresadas todas en HB.

En todos los casos, la dureza en la sección transversal desde el borde hacia el centro de la probeta presenta valores prácticamente homogéneos y coherentes con el estado metalúrgico en el que se encuentran; es decir, corresponde a la esperada en un acero de 0,45 %C, en estado de normalizado, temple y bonificado (temple seguido de revenido).

Los correspondientes valores de dureza se presentan en la tabla 1; en ella se puede apreciar que para la muestra en estado de temple en agua, la dureza promedio en la pieza, 59.1 HRC (634 HB), es coherente con la microestructura esperada para una pieza templada en la que,

además de las agujas de martensita, se espera también la presencia de austenita retenida, aunque en este caso, por los valores de dureza obtenidos, según se muestra en la figura 9, donde se muestran los efectos del contenido de carbono y martensita sobre la dureza, se trataría de un temple al 99,9 %; es decir, el porcentaje de austenita retenida sería mínimo.

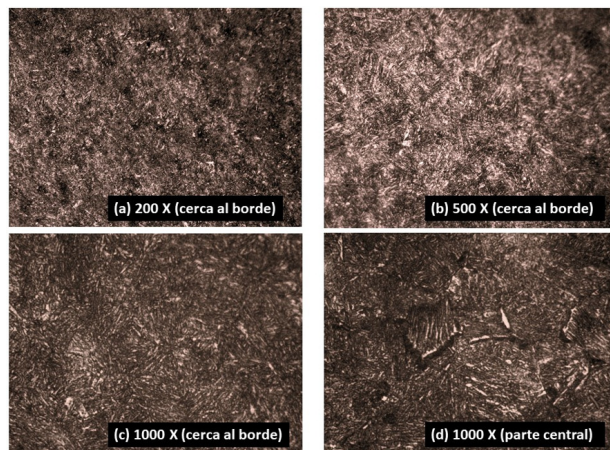


Figura 7: Micrografías de acero 1045 estado bonificado: (a) a 200X, cerca del borde. Microestructura correspondiente a la martensita revenida. (b) a 500X, cerca del borde. Microestructura correspondiente a la martensita revenida. (c) a 1000X, cerca del borde. Microestructura correspondiente a la martensita revenida. (d) a 1000X, parte central. Microestructura correspondiente a la martensita revenida.

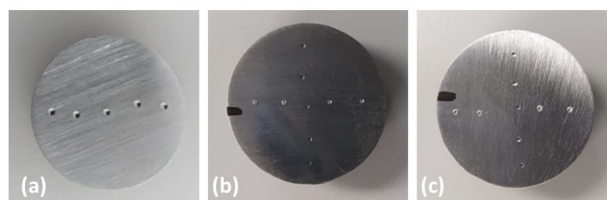


Figura 8: Probetas de acero 1045 y la ubicación de los puntos donde se registró la dureza. Probeta acero-ST (a), probeta acero-agua (b) y probeta acero-agua R (c).

Muestra	Punto	A	B	C	D	E	Promedio	Dureza (HB)
Acero-ST (HB)		222	222	197	222	232	219	219
Acero-agua (HRC)		54	59	59.5	60	63	59.1	634
Acero-agua R (HRC)		53	53	53	54	54	53.4	525

Tabla 1: Registro de dureza en los puntos estudiados para las muestras acero-ST, acero-agua y acero-agua R

En la figura 10 se muestran los espectros Mössbauer, a temperatura ambiente en la modalidad de dispersión, de las muestras de acero en estado de suministro, en estado de temple en agua y en estado de temple en agua y revenido (bonificado).

En la tabla 2 se presentan los parámetros hiperfinos asociados a la técnica EMD de las muestras en estudio. En el espectro Mössbauer de la “muestra-ST” se identifican dos sitios magnéticos asociados a la ferrita y a la perlita, confirmando los resultados obtenidos por MO.

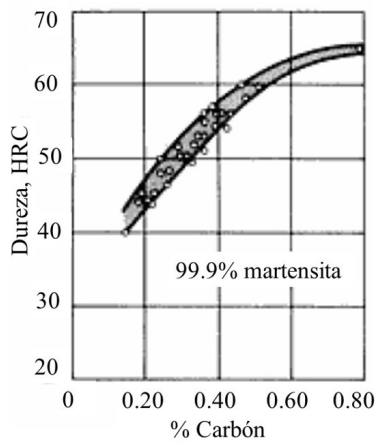


Figura 9: Efectos del contenido de carbono y martensita sobre la dureza [13].

El espectro Mössbauer de la muestra en estado de temple en agua, da cuenta de la presencia de tres sextetos asociados sitios de hierro presentes en la estructura de la martensita. Cuando la austenita de carbono se transforma mediante un proceso sin difusión (transformación martensítica) en martensita, la estructura resultante ya no es cúbica de cuerpo centrado (ccc) sino tetragonal de cuerpo centrado, tcc. Los átomos de carbono están ubicados en la estructura de martensita entre dos átomos de hierro que están alineados a lo largo de un eje expandido, el eje c tetragonal [14].

En la figura 11 se muestran los sitios de hierro en la estructura tcc de la martensita alrededor de un átomo de carbono intersticial. Los números indican las capas vecinas según la distancia al átomo de carbono en el origen [15].

Desde el enfoque de la espectroscopia Mössbauer la martensita, para la muestra en estado de temple en agua, se ha analizado tomando en cuenta, de acuerdo a la figura 11, los diversos posibles entornos de vecinos cercanos (VC) de los átomos de carbono distribuidos aleatoriamente.

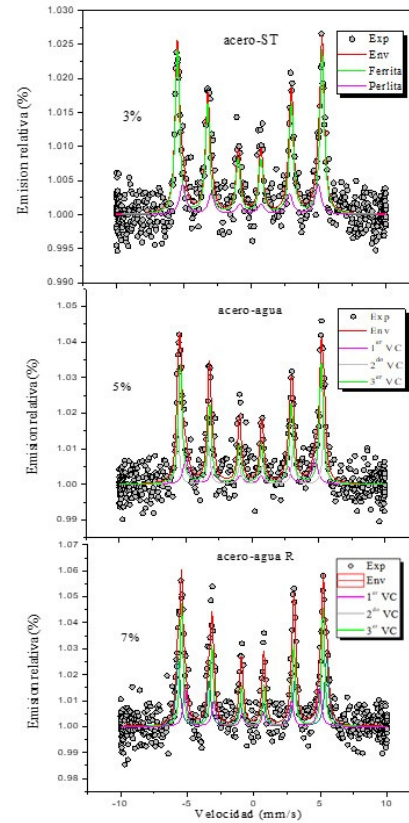


Figura 10: Espectros Mössbauer a temperatura ambiente en la modalidad de reflexión de las muestras en estudio: Acero 1045 sin tratar (acero-ST), acero 1045 templado en agua (acero-agua) y acero 1045 templado en agua y revenido (acero-agua R).

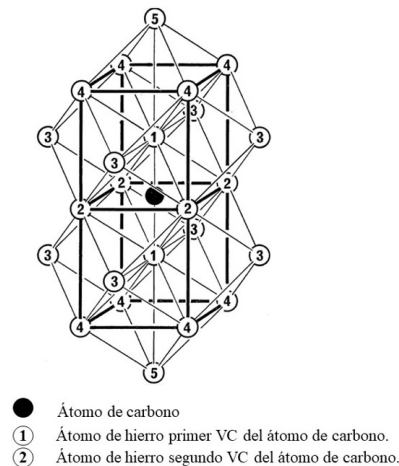


Figura 11: Estructura cristalina tetragonal de cuerpo centrado (tcc) de la martensita hierro-carbono. Los números en los puntos de red asociados a los átomos de hierro representan el orden en distancia desde el átomo central de carbono [15].

Muestra acero estado de suministro (acero-ST)				
	$\delta(\text{mm/s})$	$2\epsilon(\text{mm/s})$	Bhf(T)	A(%)
Ferrita	0.007	0.022	33.4	79.398
Perlita	0.054	0.004	31.8	20.602
Muestra acero estado temple en agua (acero-agua)				
	$\delta(\text{mm/s})$	$2\epsilon(\text{mm/s})$	Bhf(T)	A(%)
1 ^{er} VC	0.003	-0.01	30.18	17.763
2 ^{do} VC	0.003	-0.007	34.2	23.763
3 ^{er} VC	0.002	0.022	32.95	58.474
Muestra acero estado temple en agua y revenido (acero-agua R)				
	$\delta(\text{mm/s})$	$2\epsilon(\text{mm/s})$	Bhf(T)	A(%)
1 ^{er} VC	0.008	-0.023	31.33	18.918
2 ^{do} VC	-0.017	-0.048	34.68	34.612
3 ^{er} VC	0.017	-0.039	33.01	46.47

Tabla 2: Parámetros hiperfinos de las muestras en estudio. $\delta(\text{mm/s})$: corrimiento isomérico; $2\epsilon(\text{mm/s})$: Desdoblamiento cuadrupolar; Bhf(T): Campo magnético hiperfino; A(%): Área resonante. VC: Vecino cercano.

La medición por espectroscopía Mössbauer nos proporciona el campo magnético interno, el corrimiento isomérico y la interacción cuadrupolar que podrían analizarse para detectar por separado los efectos del átomo de soluto intersticial en la configuración electrónica y posiblemente configuración de la red de los primeros átomos de hierro vecinos más cercanos, los segundos vecinos cercanos y así sucesivamente [15].

En la figura 11 dentro de las esferas que representan los átomos de hierro se han colocado números que identifican el orden de la vecindad de los átomos de hierro con respecto al soluto intersticial (representado por una esfera negra), así el primer VC está representado por el número 1, el segundo vecino cercano por el número 2, etc.

Así, los átomos de carbono afectan fuertemente al primer y segundo hierro VC, mientras que los átomos de hierro en las capas exteriores exhibirán espectros más parecidos a los del $\alpha\text{-Fe}$ [14].

Las componentes Zeeman originadas a partir de la

martensita pueden descomponerse en los correspondientes a configuraciones de vecinos cercanos primer VC, segundo VC y tercer VC. En ese sentido la espectroscopía Mössbauer amplía la información proporcionada por la técnica de MO, aportando información, sobre la perturbación del ambiente electrónico, la simetría del entorno del núcleo resonante y del comportamiento magnético correspondiente. Como se mencionó anteriormente relacionando el contenido de carbono y martensita sobre el valor de dureza obtenido para esta muestra (Figura 9), se trataría de un temple al 99,9%, es decir, el porcentaje de austenita retenida, sería el mínimo, por lo que en este caso pasa desapercibido a la espectroscopía Mössbauer. El espectro Mössbauer de la muestra en estado de temple y revenido confirma tres sitios magnéticos asociados a la martensita.

En la figura 12 se muestran los espectros de FRXED correspondientes a las muestras acero-ST, acero-agua y acero-agua R, y en la tabla 3 el análisis cuantitativo correspondiente.

Elemento	acero-ST			acero-agua			acero-agua R		
	Total rayos X.	Conc. (%)	Inc. (%)	Total rayos X.	Conc. (%)	Inc. (%)	Total rayos X.	Conc. (%)	Inc. (%)
Cr	4393	0.379	0.0078	3160	0.2629	0.006	3076	0.2597	0.006
Mn	14194	1.2185	0.02	13363	1.1096	0.0184	12849	1.0832	0.0181
Fe	1009085	87.4208	1.2394	1157702	97.5007	1.3818	1118644	95.5386	1.3541
Cu	2019	0.3328	0.0088	2368	0.3856	0.0096	1976	0.325	0.0086
Suma total		89.3511			99.2588			97.2065	

Tabla 3: Porcentaje en masa de los elementos químicos identificados en las muestras.

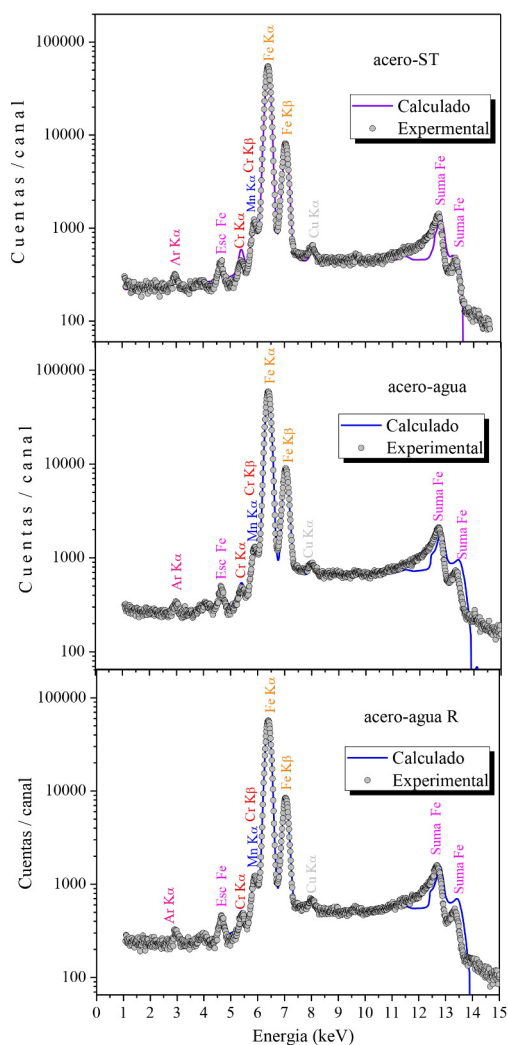


Figura 12: Espectros FRXED de las muestras en estudio: Acero 1045 sin tratar (acero-ST), acero 1045 templado en agua (acero-agua) y acero 1045 templado en agua y revenido (acero-agua R).

En todas las muestras se logró identificar hierro, manganeso, cromo y cobre. Como es de esperarse el hierro se encuentra en mayor concentración seguido del manganeso. Todos los aceros al carbono contienen cantidades moderadas de Mn (hasta 0,9%) y no se consideran aleados pues la función principal del Mn es actuar como desoxidador, se combina con el oxígeno y con el azufre para reducir el efecto nocivo de dichos elementos [16]. En ese sentido, la adición de manganeso forma parte del proceso de elaboración del acero. Este elemento, agregado en cantidades suficientes remueve el azufre formando MnS, que forma inclusiones en el acero. El efecto de las inclusiones de MnS no es tan perjudicial como el efecto del azufre libre, que tiende a segregarse en los límites de grano y

causar fragilización [17].

Se sabe que el cobre mejora la resistencia a la corrosión de algunos aceros y que el cromo aumenta la dureza y la resistencia a la tracción, mejora la templabilidad, impide deformaciones producto del temple, aumenta la resistencia al desgaste y proporciona inoxidableidad [11]; sin embargo, en vista de que estos elementos se encuentran en muy baja concentración, no se podría afirmar que le confieren al acero 1045 las propiedades antes mencionadas.

También se observan los siguientes picos: el pico de rayo X $K\alpha$ de Argón que se encuentra en el ambiente, el pico de escape K de hierro ubicado a 4,66 keV aproximadamente [18] y los picos suma K de hierro a 12,7 keV y 13,3 keV [19]. Se puede identificar también el pico de oro a 9,7 keV que proviene del ánodo de oro usado como blanco para la generación de los rayos X.

Las especificaciones técnicas para el acero 1045 [20] reportan concentraciones menores que 0,04% en masa para el fósforo y 0,05% en masa para el azufre, considerando además la alta intensidad de los picos de hierro, estos elementos no estarían siendo identificados porque estarían por debajo de los límites de detección del instrumento de medida.

Conclusiones

La técnica de MO pone en evidencia una microestructura martensítica típica de un acero en estado de temple en agua, homogénea en el borde y en el centro de la pieza con lo que se infiere un temple homogéneo en toda la sección de la barra templada.

El registro de dureza para la muestra en estado de temple en agua hace evidente un temple al 99,9%, es decir, con un mínimo porcentaje de austenita retenida.

La espectroscopía Mössbauer y la fluorescencia de rayos X constituyen un conjunto de herramientas valiosas que complementan los resultados de los estudios de aceros por métodos convencionales.

Las variaciones de los parámetros hiperfinos obtenidos por la técnica de espectroscopía Mössbauer están relacionados con la modificación del entorno cristalino del hierro en la estructura del acero.

Se pueden distinguir tres sextetos magnéticos asociados a la martensita, debido a los átomos de hierro que son los primeros, segundos y terceros vecinos más cercanos a un átomo de carbono intersticial.

El tratamiento de revenido produce modificación de las estructuras, transformando la martensita y disminuyendo su dureza.

Los resultados de la FRX muestran que las piezas analizadas tienen, en promedio, similar composición química como es de esperarse en piezas libres de segregación química.

En todas las muestras se logró identificar hierro, manganeso, cromo y cobre. Como es de esperarse el hierro se encuentra en mayor concentración seguido del manganeso. El cromo y el cobre se encuentran en bajas proporciones por lo que no se consideran elementos de aleación en este caso.

Se espera que el presente trabajo sirva como punto de partida para establecer nexos de cooperación interdisciplinaria y el sector industrial.

Agradecimientos

Agradecemos la colaboración de la empresa de aceros Bohler Perú por haber brindado las facilidades para la obtención de las muestras en estudio. Asimismo, agradecemos a la Facultad de Ingeniería, Departamento de Ingeniería Mecánico-Eléctrica de la Universidad de Piura por brindar las facilidades en cuanto al uso de la sala de hornos, las medidas de dureza y los análisis por microscopía óptica en su Laboratorio de Metalotecnia.

Referencias

- [1] S. K. Dugall. Building materials: Ferrous metals. Daryaganj, New Delhi: New Age International (P) Ltd., Publishers. (2008).
- [2] W. F. Hosford. Physical metallurgy: Steels. Taylor & Francis Group, LLC : Boca Raton Florida. (2010).
- [3] P.A. Schweitzer. Metallic materials. Physical, mechanical, and corrosion properties : Carbon Steel. Marcel Dekker, Inc. New York. (2003).
- [4] S. J. Campbell, W.A. Kaczmarek, M. Hofmann. Mössbauer insight to metallurgy, materials science and engineering. Hyperfine Interactions, 126, 175-186. (2000).
- [5] Manual de aceros especiales. Aceros Böhler del Perú. Lima. sf. https://www.voestalpine.com/highperformancemetals/peru/app/uploads/sites/22/2022/08/48_BOHLER-H.pdf
- [6] N. N. Greenwood, T. C. Gibb. Mössbauer spectroscopy. Chapman and Hall Ltd. London. (1971).
- [7] P. Gütlich, E. Bill, A.X. Trautwein. Mössbauer Spectroscopy and transition metal chemistry: Fundamentals and applications. Springer. Verlag Berlin Heidelberg. (2011).
- [8] A. Maddock. Mossbauer spectroscopy: Principles and applications. Horwood Publishing Chichester. England. (1997).
- [9] C. Otero. Espectroscopía de luminiscencia: Fluorescencia y fosforescencia. En M. Faraldos y C. Goberna (Eds.), Técnicas de análisis y caracterización de materiales.: Consejo superior de investigaciones científicas. Ministerio de ciencia e innovación, gobierno de España. Madrid. (2011).
- [10] T. Huang. (1992). X ray fluorescence. En C. Brundle, C. Evans y S. Wilson (Eds.), Encyclopedia of materials characterization: Surfaces, interfaces, thin films. Stoneham: Butterworth-Heinemann, a division of Reed Publishing Inc. USA. (1992).
- [11] M. E. Sánchez y I. E. Campos. Tecnología de materiales. Trillas, México/D.F. (2010).
- [12] R.A. Brand. Normos: Mössbauer Fitting Program. (1995).
- [13] American Society for Metals. Metals Handbook Desk Edition (2a edición). (1998). [https://ftp.idu.ac.id/wp-content/uploads/ebook/tdg/TEKNOLOGI%20REKAYASA%20MATERIAL%20PERTAHANAN/Metals%20Handbook%20Desk%20Edition%202nd%20Edition%20by%20J.%20R.%20Davis,%20Asm%20International%20Handbook%20Committee%20\(z-lib.org\).pdf](https://ftp.idu.ac.id/wp-content/uploads/ebook/tdg/TEKNOLOGI%20REKAYASA%20MATERIAL%20PERTAHANAN/Metals%20Handbook%20Desk%20Edition%202nd%20Edition%20by%20J.%20R.%20Davis,%20Asm%20International%20Handbook%20Committee%20(z-lib.org).pdf)
- [14] U. Gonser. Mossbauer Spectroscopy and Physical Metallurgy. En L. May (Ed.), An Introduction to Mossbauer Spectroscopy (pp. 155-149). Plenum Press, New York. (1971).
- [15] T. Moriya, I. Hiromitsu, E. Fujita. Mössbauer Effect in Iron-Carbon Martenite Structure. Journal of the Physical Society of Japan, 24 (1), 60-68 (1968).
- [16] S. Avner. Introducción a la metalurgia física. Mc Graw-Hill. Naucalpan de Juarez, Edo. de Mexico (1988).
- [17] G. Haidemenopoulos. Physical metallurgy. Principles and design. Taylor & Francis Group, LLC. (2018).
- [18] J. Bravo. Dependencia en energía de la producción de picos de escape en espectroscopía de fluorescencia de rayos-X dispersiva en energía. Revista de investigación de Física, 18(1), 1-5 (2015). <https://doi.org/10.15381/rif.v18i1.11575>
- [19] J. Bravo. Intensidad y distribución en energía de picos suma en espectroscopía de Fluorescencia de

rayos-X dispersiva en energía. *Revista de investigación de Física*, 25 (3), 35-39 (2022). <https://doi.org/10.15381/rif.v25i3.24282>

[20] ASTM International. Norma A29/A29-15. Stan-

dard Specification for General Requirements for Steel Bars, Carbon and Alloy, Hot-Wrought. <https://pdfcoffee.com/qdownload/astm-a29-a29m-pdf-free.html>