

INFLUENCIA DE LOS TRATAMIENTOS TÉRMICOS DE TEMPLE Y TEMPLE -REVENIDO EN LA RESPUESTA MECÁNICA Y MICROESTRUCTURAL DE UN ACERO PARA APLICACIONES ESTRUCTURALES

Influence of the heat treatment of quenching and quenching-annealing in the mechanical and microstructural response of a structural steel

Juan C. Sánchez^{1,2*}, Jaime A. Jaramillo^{1,2}, Sebastián Londoño^{1,2}, Santiago Salinas^{1,2}, Alejandro Vásquez^{1,3}

Grupo de Automatización, Comunicaciones Industriales, Pedagogía y Energías Alternativas – GACIPE, Centro de Tecnología de la Manufactura Avanzada, Servicio Nacional de Aprendizaje- SENA, Regional Antioquia, Medellín

² Semillero de Investigación en Manufactura Aditiva y Maquinado no convencional – MAMCO, Centro de Tecnología de la Manufactura Avanzada, Servicio Nacional de Aprendizaje- SENA, Regional Antioquia, Medellín

Laboratorio de Ensayos Mecánicos y Metalografía, CTMA, Centro de Tecnología de la Manufactura Avanzada, Servicio Nacional de Aprendizaje- SENA, Regional Antioquia, Medellín

*Correo de contacto: jcsanchezg@sena.edu.co

Resumen

El presente trabajo muestra la influencia de los tratamientos térmicos en la respuesta mecánica de barras de acero corrugado de 0.30%C evaluadas mediante ensayos mecánicos como tracción y durezas. Se cortaron probetas de 22cm de longitud y diámetro de 1/2" para posteriormente ser llevadas a los hornos y ser sometidas a dos tratamientos térmicos, uno de temple y otro de temple y revenido. Luego se sometió cada una de ellas a ensayos de tracción, dureza y análisis metalográfico y se compararon con el material en estado de entrega como referencia. Los resultados mostraron una influencia evidente en cuanto a los valores de dureza y tracción para el material asociado a cada uno de los tratamientos térmicos realizados en comparación con el material de referencia. En cuanto a la dureza, se identificó un aumento marcado en la probeta templada en comparación con las otras dos, siendo esta, la que reportó valores más altos. Para los ensayos de tracción, de igual manera los valores más altos fueron reportados por la muestra con tratamiento de temple, seguida por la templada-revenida y estado de entrega. En cuanto a la microestructura, para el

material base se identificó ferrita con algunos granos perlíticos diferente a las otras dos probetas tratadas donde se alcanzan a identificar zonas con martensita y martensita revenida.

Palabras claves: *acero – temple - temple y revenido
dureza – tracción*

Abstract

This work shows the influence of the heat treatments on the mechanical response of steel rebars of 0.30%C evaluated through tensile and hardness tests. Section were cut of 22cm and 1/2" of diameter and after put them inside the furnaces for quenching and quenching-annealing. Each sample was compared respect to a reference rebar (delivery status) tensile test, hardness and metallography analysis. The results showed a marked influence of the heat treatment regarding the tensile values and hardness compared with the reference sample. The higher hardness value and maximum tensile stress were showed by the quenched sample with respect to the

ferritic and pearlitic microstructure, the quenched samples evidenced a martensitic structure and the quenched-annealed rebar showed a martensitic microstructure with several grains of annealed martensitic.

Keywords: steel – quenching - quenching and annealing – hardness - traction

I. INTRODUCCIÓN

Actualmente, aunque el desarrollo de nuevos materiales está en un incremento acelerado en diferentes campos de aplicación, no es un secreto que aleaciones como el acero siguen siendo de gran importancia para el área de la construcción por su versatilidad en cuanto a relaciones resistencia, peso y costo. El uso de barras corrugadas para el refuerzo de aplicaciones estructurales fue alrededor de mediados del siglo XIX [1] convirtiéndose en un importante papel con el pasar de los años en el refuerzo y soporte de cargas en la construcción de edificaciones. El proceso de manufactura de este tipo de barras normalmente se da por rolado en frío, lo que ha reportado una baja transferencia de propiedades al concreto favoreciendo la baja ductilidad en el compuesto [2] que se ve mejorada en cuanto a su desempeño con la aplicación de tratamientos térmicos; manteniéndose actualmente como material de refuerzo para el concreto por su aporte en el aumento de la resistencia de estructuras [3], a partir de un incremento en el desempeño en propiedades mecánicas mecánico del material compuesto. Adicional a esto, el acero es material usado en la manufactura de múltiples componentes en ingeniería para diversas aplicaciones [4]–[8] por su buena respuesta a diferentes tipos de cargas como: tracción, compresión, flexión, torsión; además de poder mejorar este comportamiento con el uso de procesos a alta temperatura como tratamientos térmicos como ya fue mencionado, que permiten un aumento en la dureza y en su respuesta mecánica. Uno de los tratamientos más utilizados para conseguir este tipo de características en un acero es el temple [9]–[11], que consiste básicamente en llevar la pieza por encima de la temperatura de austenización e impedir, en el enfriamiento, que se toque la nariz de transformación en el diagrama TTT (Temperatura, Tiempo, Transformación), por lo que el enfriamiento debe ser rápido y comúnmente con medios como aceite [11] debido a que el agua podría traer inconvenientes de fragilidad en ciertas zonas de la pieza y proceso de oxidación. El aumento de dureza con el tratamiento térmico está asociado al porcentaje de carbono [12], [13], factor que en gran parte, define la templabilidad del material e impidiendo que se supere ciertos valores de esta propiedad que directamente está relacionada con la resistencia a la tracción, razón por la cual, con el tratamiento de temple también se tiene un aumento significativo de esta propiedad.

Los ensayos de dureza y tracción son de los más comunes para caracterizar componentes de materiales metálicos en la industria, por lo que muchos de estos ensayos son necesarios implementarlos bajo normas internacionales que avalen los

resultados y den confiabilidad de los valores obtenidos. Aunque existen diferentes instituciones que rigen muchas de las normas para materiales a nivel internacional y nacional como: ASTM, ISO, DIN, JIS, ICONTEC etc., las dos primeras son de gran aplicabilidad y uso en la industria colombiana, sin dejar a un lado y quitarles importancia a las otras ya existentes.

En el presente trabajo se muestran los resultados obtenidos luego de evaluar la respuesta mecánica de un material estructural en barras de acero corrugado sometidas a dos tratamientos térmicos de temple y temple-revenido, comparadas con el material en estado de entrega. Para cada una de las probetas se hicieron pruebas de tracción, dureza y análisis metalográfico con el fin de identificar su influencia en su comportamiento mecánico.

II. METODOLOGÍA

La metodología se dividió en 6 etapas como se ilustra en la Fig. 1.

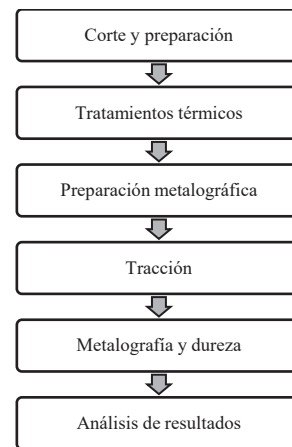


Fig. 1. Esquema de las etapas consideradas para el procedimiento metodológico.

A continuación, se detalla cada una de las etapas enunciadas en el esquema anterior:

Corte y preparación

Se definió un acero estructural como material de ensayos en presentación de barras corrugadas. Para los ensayos de tracción se cortaron muestras de barras de ½” aproximadamente de 25 cm y un tramo de 1” de longitud para la preparación metalográfica y medición de dureza

Tratamientos térmicos

Luego de tener los tramos de barra preparados para cada uno de los ensayos, se hizo el proceso de tratamiento térmico de temple y temple-revenido en cada una de las muestras con un tramo como testigo para metalografía y dureza. Cada una de las secciones fueron introducidas al horno a una temperatura de austenización de 900°C durante una hora y

enfriadas en aceite para el tratamiento de temple, para el revenido, se sometió el material a una temperatura de 450°C durante una hora y enfriado a la inercia del horno. La Fig. 2 muestra el esquema de las rampas de temperatura usadas con los tiempos de sostenimiento.

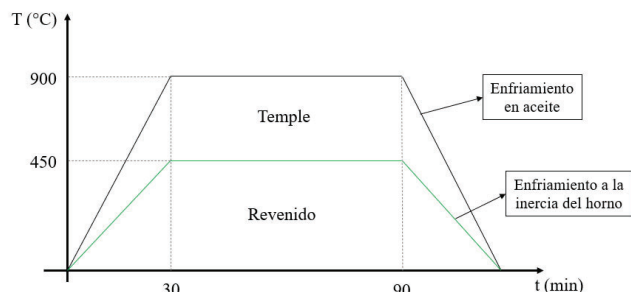


Fig. 2. Esquema representativo de las rampas de temperatura en el proceso de tratamientos térmicos

Preparación metalográfica

La preparación metalográfica se basó en el montaje de pequeños tramos de la sección transversal de cada una de las barras usadas en los ensayos (aproximadamente 5 mm de altura) en baquelita para una posterior preparación de la superficie a caracterizar con base en la norma ASTM-E8. Esta preparación se hizo para el análisis microestructural y de dureza posterior a los tratamientos térmicos.

Tracción

Las muestras previamente cortadas fueron ensayadas en una máquina universal SHIMADZU UH-50A bajo la norma ASTM E8. Para el ensayo se establecieron las medidas de la longitud calibrada y medición de diámetro antes de ser montadas a la máquina, luego de romperse se hicieron medidas nuevamente para las mismas variables y calcular la deformación unitaria y el porcentaje de reducción de área. Las probetas tratadas térmicamente fueron igualmente comparadas con el material en estado de entrega sin ningún tratamiento

Metalografía y dureza

Luego de la preparación metalográfica de cada uno de los “testigos” de las barras sometidas a tratamiento térmico, se hizo un análisis microestructural de cada una de las muestras preparadas con el uso de un microscopio de luz reflejada ZEISS Axioscope 5. Posteriormente se hicieron mediciones de dureza en un durómetro universal INNOVATEST Fenix 300 usando un indentador cónico de diamante para dureza Rockwell. Las muestras tratadas fueron comparadas con una sección del mismo material en estado de entrega sin tratamiento térmico.

Adicionalmente, se preparó la superficie con papel abrasivo n.ASTM 600 para un análisis químico con el uso de espectrómetro de emisión óptica BRUKER Q8 MAGELLAN.

Análisis de resultados

Finalmente, los resultados obtenidos fueron analizados y correlacionados con el fin de ver la influencia de los tratamientos térmicos en la respuesta mecánica y microestructural de cada una de las muestras ensayadas.

III. RESULTADOS Y DISCUSIÓN

Metalografía y dureza

La TABLA I muestra la composición química del acero de las barras corrugadas ensayadas.

TABLA I. COMPOSICIÓN QUÍMICA DEL MATERIAL DE BARRA CORRUGADAS ENSAYADAS

Elemento	C	Si	Mn	P	S	Cr	Mo
%wt	0,308	0,210	1,094	0,015	0,029	0,168	0,016
Ni	Cu	Al	Co	Nb	Sn	Ti	V
0,114	0,249	0,002	0,009	0,002	0,025	<0.00020	0,020

Los resultados obtenidos en composición clasifican el acero como un AISI 1030 [14].

Las Fig. 2, 3 y 4 muestran las micrografías de las probetas en estado de entrega, templada y templada-revenida respectivamente.

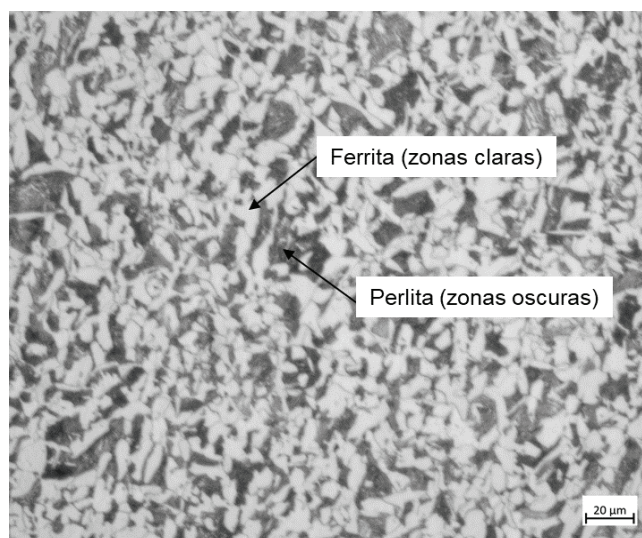


Fig. 2. Micrografía del material en estado de entrega.

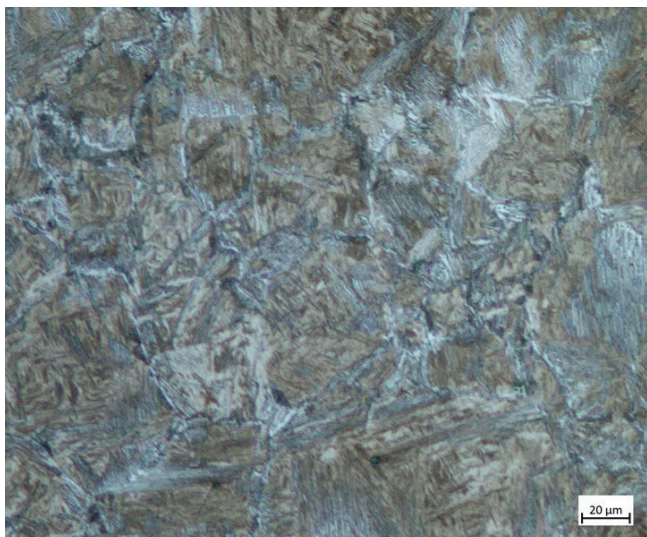


Fig. 3. Micrografía de la microestructura del material luego de tratamiento de temple.

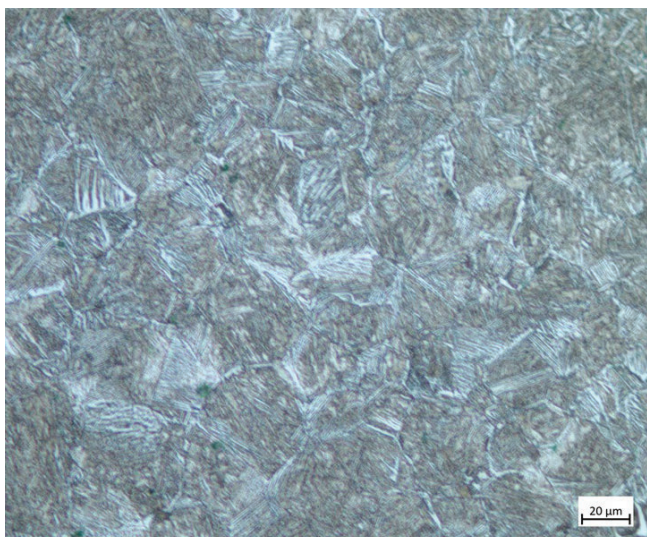


Fig. 4. Micrografía de la microestructura del material luego de tratamiento de temple y revenido.

La Fig.2 muestra claramente una microestructura acorde al contenido de carbono que se reportó en el análisis químico (Tabla I). Se observa una microestructura principalmente ferrítica, como es de esperarse para un acero hipoeutectoide, con granos perlíticos formado en el eutectoide en el proceso de solidificación del material. En la Fig. 3, para la muestra sometida a un tratamiento de temple, se observa una microestructura martensítica con la que se espera un aumento en la respuesta de las muestras a tracción y dureza. Para la Fig.4, se alcanza a observar granos martensíticos asociados al tratamiento de temple, sin embargo, como la muestra fue sometida de igual manera a un tratamiento de revenido, se alcanzan a identificar unas zonas más clara que dan indicios a la presencia de martensita revenida, lo que sugiere valores de tracción y dureza inferiores a la probeta templada pero superior la que fue ensayadas en estado de entrega.

La Fig. 5 muestra una gráfica de los valores de dureza medidos en cada una de las muestras.

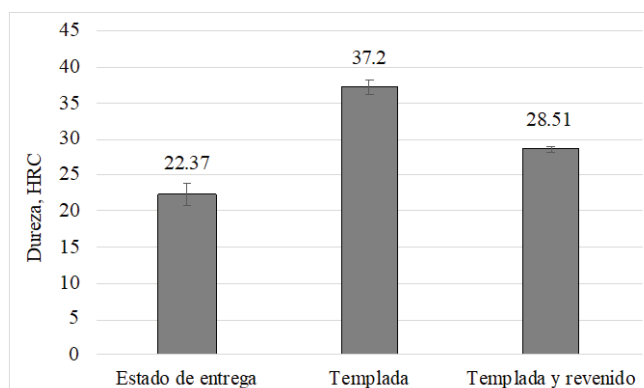


Fig. 5. Valores de dureza medidos en cada una las probetas ensayadas.

En la figura (Fig. 5) se alcanza a apreciar un aumento considerable de esta propiedad en función a los tratamientos térmicos como era de esperarse con lo observado en las micrografías (Fig.2, Fig.3, Fig.4). El valor más alto fue mostrado por la muestra sometidas al tratamiento térmico de temple con una dureza promedio de 37HRC, acorde a lo esperado teóricamente a la templabilidad de este material con base en el contenido de carbono reportado [12]. El dato medido más bajo fue para el material en estado de entrega alrededor de 22HRC. Para la probeta templada y revenida, se obtuvieron valores de dureza intermedios de alrededor de 28HRC, como era de esperarse después de someter una probeta templada a un proceso de alivio de tensiones con el tratamiento de revenido.

Tracción

Los resultados obtenidos para cada una de las probetas ensayadas bajo la prueba de tracción son mostrados en la fig. 6.

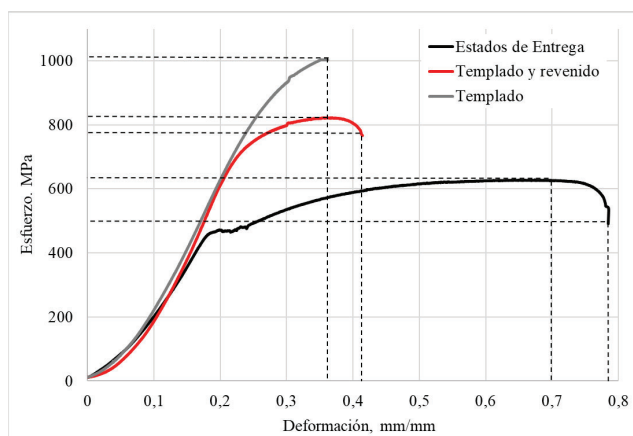


Fig. 6. Gráfica esfuerzo vs deformación para cada una de las muestras ensayadas.

La Fig. 6 evidencia claramente un aumento en la resistencia a la tracción con los tratamientos térmicos. Los valores alcanzados para el material en estado de entrega muestran claramente un menor módulo de Young en comparación con la muestra templada y templada-revenida, además de evidenciar una tenacidad más alta asociada directamente a la ductilidad del material como se alcanza a diferenciar en las Fig. 7, 8 y 9 (área bajo la curva esfuerzo vs deformación), donde se ve claramente la reducción del área con la formación del cuello luego de alcanzar el esfuerzo último. El esfuerzo máximo que se alcanzó en estado de entrega, que fue 628MPa, va acorde a lo especificado por catálogos comerciales de barras de acero corrugado donde se reporta un valor aproximado de 630MPa.



Fig. 7. Imagen de la zona de ruptura de la probeta en estado de entrega.



Fig. 8. Imagen de la zona de ruptura de la probeta templada.



Fig. 9. Imagen de la zona de ruptura de la probeta templada y revenida.

Las Fig. 10 y 11 muestran claramente lo enunciado anteriormente y mostrado en las Fig. 7, 8 y 9. La Fig. 10 muestra el porcentaje de elongación en comparación con la carga máxima de tracción soportada por cada una de las probetas y la Fig. 11 el porcentaje de reducción de área en función de la carga máxima.

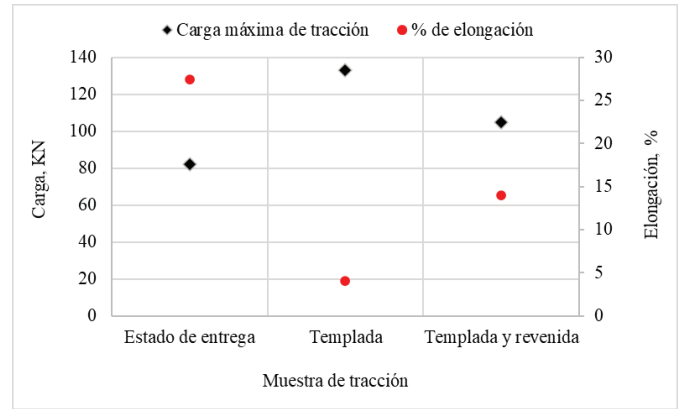


Fig. 10. Relación de carga máxima y porcentaje de elongación.

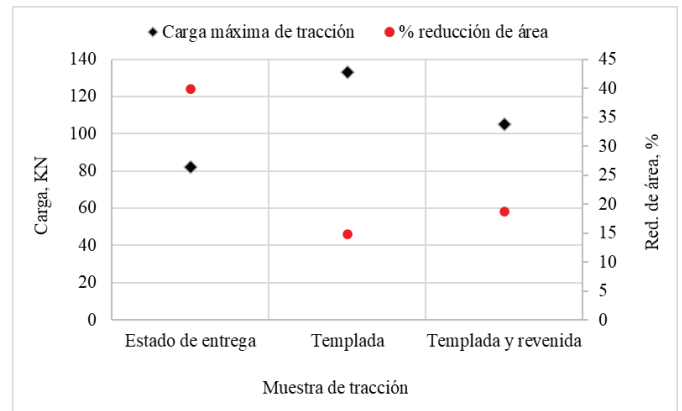


Fig. 11. Relación de carga máxima y porcentaje de reducción de área.

En cada uno de los casos, la propiedad de ductilidad, relacionada con el porcentaje de elongación y reducción de área, se comportan de manera inversa a la carga soportada por cada una de las probetas como se mencionó y mostró mostro en la Fig. 6. Para el material en estado de entrega, que fue el que soportó menos cargas antes de la ruptura, reportó el valor más alto de reducción de área y porcentaje de elongación, contrario a la probeta templada, que reportó el valor más bajo junto con el máximo valor de carga que se midió en los ensayos. Para la muestra templada-revenida se reportaron valores intermedios en cada caso.

IV. CONCLUSIONES

La propiedad de dureza aumenta significativamente con el tratamiento térmico de temple debido a cambios microestructurales en comparación con el material en estado de entrega. Además, el tratamiento de revenido para el alivio de tensiones reduce el valor de dureza en comparación con el conseguido después del temple.

Los esfuerzos de resistencia última del material de las probetas ensayadas cuando es sometido a tratamientos térmicos de aumento de dureza se incrementan significativamente en comparación con el estado de entrega.

Con el aumento de la resistencia a la tracción del material, se ve sacrificado el porcentaje de elongación y reducción de área, además la tenacidad de cada una de las muestras ensayadas se ve reducida igualmente con la reducción del área bajo la curva esfuerzo vs deformación (Fig. 6), relacionada directamente con la pérdida de ductilidad, evidenciado también en las Fig. 7, 8 y 9.

AGRADECIMIENTOS

Los autores agradecen al Laboratorio de Ensayos Mecánicos y Metalografía del Centro de Tecnología de la Manufactura Avanzada - SENA por su apoyo en los ensayos mecánicos y en el suministro de material utilizado para los ensayos

REFERENCIAS

- [1] P. Chess and W. Green, *Durability of reinforced concrete structures*. Boca Raton, FL: CRC Press, 2019.
- [2] F. SUI, Q. CHEN, G. ZHU, and B. LIU, "Deformation Uniformity of Cold-Rolled Q235 Steel Rebar by FEM in Bending and Rolling Processes," *J. Iron Steel Res. Int.*, vol. 19, no. 8, pp. 37–42, 2012.
- [3] T. Achamyeleh, H. Çamur, M. A. Savaş, and A. Evcil, "Mechanical strength variability of deformed reinforcing steel bars for concrete structures in Ethiopia," *Sci. Rep.*, vol. 12, no. 1, pp. 1–10, 2022.
- [4] D. K. Matlock, G. Krauss, and J. G. Speer, "New Microalloyed Steel Applications for the Automotive Sector," *Mater. Sci. Forum*, vol. 500–501, pp. 87–96, 2005.
- [5] N. R. Baddoo, "Stainless steel in construction: A review of research, applications, challenges and opportunities," *J. Constr. Steel Res.*, vol. 64, no. 11, pp. 1199–1206, 2008.
- [6] B. H. Smith, S. Szyniszewski, J. F. Hajjar, B. W. Schafer, and S. R. Arwade, "Steel foam for structures: A review of applications, manufacturing and material properties," *J. Constr. Steel Res.*, vol. 71, pp. 1–10, 2012.
- [7] S. K. Mandal, *Steel Metallurgy: Properties, Specifications and Applications*, First edit. New York: McGraw-Hill Education, 2015.
- [8] B. W. Schafer, "Cold-formed steel structures around the world," *Steel Constr.*, vol. 4, no. 3, pp. 141–149, Aug. 2011.
- [9] J. G. Speer, E. De Moor, K. O. Findley, D. K. Matlock, B. C. De Cooman, and D. V. Edmonds, "Analysis of Microstructure Evolution in Quenching and Partitioning Automotive Sheet Steel," *Metall. Mater. Trans. A*, vol. 42, no. 12, p. 3591, 2011.
- [10] Z. Cai, J. Zhao, and H. Ding, *Metals Handbook - Heat treating Vol. 4*. Detroit: ASM International, 2017.
- [11] G. Krauss, "12.11 - Quench and Tempered Martensitic Steels: Microstructures and Performance," S. Hashmi, G. F. Batalha, C. J. Van Tyne, and B. B. T.-C. M. P. Yilbas, Eds. Oxford: Elsevier, 2014, pp. 363–378.
- [12] L. C. F. Canale, L. Albano, G. E. Totten, and L. Meekisho, "12.03 - Hardenability of Steel," in *Comprehensive Materials Processing*, S. Hashmi, G. F. Batalha, C. J. Van Tyne, and B. B. T.-C. M. P. Yilbas, Eds. Oxford: Elsevier, 2014, pp. 39–97.
- [13] J. R. Davis, Ed., "Hardenability of Carbon and Alloy Steels," *Metals Handbook Desk Edition*. ASM International, p. 0, 01-Dec-1998.
- [14] G. et al Aggen, *ASM Metals Handbook - Properties And Selection Iron*, 10th ed. USA: ASM International, 1993.

BIOGRAFÍAS DE LOS AUTORES

Juan Camilo Sánchez González
 Doctor en Ingeniería – Ciencia y Tecnología de los Materiales
 Magíster en Ingeniería en Materiales y Procesos
 Ingeniero Mecánico
 Líder del Grupo de Investigación en Automatización, Comunicaciones Industriales, Pedagogía y Energías Alternativas – GACIPE

Investigador Junior – Minciencias
 ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-4243-8436>

Jaime Alberto Jaramillo Carvalho
 Aspirante a Doctor en Ingeniería – Ciencia y Tecnología de los Materiales
 Magíster en Ingeniería en Materiales y Procesos
 Ingeniero Mecánico
 Dinamizador SENNOVA – Centro de Tecnología de la Manufactura Avanzada
 ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-2213-6078>

Sebastián Londoño Cardona
 Aprendiz de Tecnología en Mantenimiento Mecánico Industrial
 Técnico en Mantenimiento de Motocicletas
 Integrante del semillero de Manufactura Aditiva y Maquinado no Convencional – MAMNCO

Santiago Salinas Agudelo
 Aprendiz de Tecnología Diseño de Elementos Mecánicos para su fabricación con herramientas de máquinas CNC
 Técnico Metalmecánico
 Técnico Mecanizado en productos Metalmecánicos
 Integrante del semillero de Manufactura Aditiva y Maquinado no Convencional – MAMNCO

Alejandro Vásquez Gallo
 Ingeniero Mecánico
 Estudiante de Maestría en Ingeniería en Materiales y Procesos
 Técnico en el Laboratorio de Ensayos Mecánicos y Metalografía del Centro de Tecnología de la Manufactura Avanzada