

Evaluación del comportamiento mecánico de aceros grado AISI (1045 y 304) sometidos a endurecimiento por deformación plástica

R.A. García-León^{1*}, H. Angarita-Álvarez¹, A. Castilla-Pérez¹, E. Flórez-Solano¹, J. Martínez-Trinidad², and L. Moreno-Pacheco²

¹ Universidad Francisco de Paula Santander Ocaña, Grupo de Investigación INGAP, Semillero SIIST, CP. 546554, Ocaña, Colombia.

² Instituto Politécnico Nacional, SEPI-ESIME Zacatenco, CP. 07738, Ciudad de México, México

Correspondence to ragarcial@ufpso.edu.co

Resumen

El conocimiento de la curva esfuerzo-deformación es de gran interés debido a los diferentes parámetros, condiciones y aplicaciones a las que se ven expuestos los materiales en los diferentes sectores industriales. El objetivo de este trabajo de investigación es desarrollar un análisis experimental del endurecimiento por deformación en materiales grado AISI 1045 y 304, modificando las propiedades mecánicas superficiales mediante el tratamiento térmico de temple y recocido, y así realizar los ensayos de tensión considerando los parámetros establecidos por la norma ASTM E-8 bajo diferentes porcentajes de endurecimiento por deformación plástica (20 y 40% de endurecimiento por deformación) utilizando un número total de 45 muestras para el conjunto experimental general. Los resultados mostraron que una mejora en las propiedades mecánicas del material en función del porcentaje de endurecimiento del material, también relacionado con el tratamiento térmico. Finalmente, se pudo encontrar que el esfuerzo de fluencia de los materiales aumentó significativamente hasta un 100% (de 376 a 607 MPa) para un endurecimiento por deformación del 40% en relación al material original (tal como se recibió), relacionado con la capacidad de endurecimiento por deformación calculada matemáticamente.

Palabras clave: Endurecimiento por deformación, zona plástica, curva tensión-deformación, tratamientos térmicos.

Abstract

The knowledge of the stress-strain curve is of great interest due to the different parameters, conditions, and applications in which the materials are exposed in the different industrial sectors. The objective of this research work is to develop an experimental analysis of strain hardening on AISI 1045 and 304-grade materials, modifying the superficial mechanical properties through the heat treatment of quenching and annealing, and thus carry out the tension tests considering the parameters established by the ASTM E-8 standard under different percentages of hardening by plastic deformation (20 and 40% strain hardening) using a total number of 45 samples for the general experimental set. The results exposed that an improvement in the mechanical properties of the material as a function of the hardening percentage of the material, also related to the heat treatment. Finally, was possible found that the yield stress of the materials increased significantly up to 100% (from 376 to 607 MPa) for 40% strain hardening in relation to the original material (as received), related to the strain hardening capacity mathematically calculated.

Keywords: Strain hardening, plastic zone, stress-strain curve, heat treatments.

1. Introducción

En el diseño de elementos de máquinas, es importante conocer cómo se comportan los materiales de forma mecánica y microestructural, debido a que constantemente los materiales son afectados por diferentes factores, como la temperatura y las cargas, las cuales generan esfuerzos tanto en su manufactura,

funcionalidad durante su tiempo de vida útil en sus diferentes aplicaciones industriales, generando cambios en sus propiedades mecánicas y físicas principalmente [1]. El endurecimiento por deformación en aleaciones utilizadas en la industria aeroespacial, donde el endurecimiento por deformación se produce cuando un material se deforma plásticamente y experimenta una mayor

resistencia a la deformación. Este fenómeno es importante en las industrias debido a que las aleaciones utilizadas en la fabricación de piezas, elementos mecánicos, insumos y en diseño de componentes que a menudo se someten a cargas de alta tensión.

Actualmente los diferentes aceros y aleaciones que son utilizados en diferentes aplicaciones industriales deben ser caracterizados de tal manera que se puedan cuantificar sus parámetros de diseño (elasticidad y plasticidad, principalmente) que son utilizados para el mecanizado de piezas y componentes mecánicos. Es por esta razón, que los aceros utilizados en este proyecto de investigación serán sometidos a tratamientos térmico de recocido (temple y recocido) y ensayos de tensión, donde se realizarán variaciones en la zona de endurecimiento por deformación considerando la curva de esfuerzos para los materiales como son recibidos originalmente. De esta manera, evaluar el mejoramiento de las propiedades mecánicas de las muestras de los aceros como lo son: la dureza, tensión, carga máxima y límite elástico. Además, el conocimiento de los parámetros de diseño de los aceros nos permite realizar un análisis preciso para proponer diseños mecánicos más confiables y con una vida útil más larga, basado en la selección de los materiales considerando las aplicaciones industriales que corresponda [2].

Diversos autores han enfocado en sus estudios el mejoramiento de las propiedades mecánicas de los diferentes tipos de metales (aceros y aleaciones), a través de diferentes tratamientos térmicos, termoquímicos, de deposición y mecánicos [3], convirtiéndose en una alternativa a los problemas que pueden presentar estos metales en la industria, como por ejemplo: tiempos muertos y fallas de los componentes de un sistema mecánico, viéndose reflejado esto en el factor económico para las empresas [4].

Guerrero-Lara (2015) [5], analizaron la tasa de desgaste del acero AISI 1045 tratado térmicamente con temple y normalizado a través del desgaste abrasivo en medio acuoso teniendo en cuenta la norma ASTM-G105. Los resultados mostraron que los tratamientos mejoran la resistencia al desgaste de los materiales. Ravagli, *et al.* (2019) [6], estudiaron la resistencia al desgaste del acero AISI 1045 templado con agua y aceite. Los resultados obtenidos mostraron que en todos los aceros templados el coeficiente de fricción es menor en comparación con los discos en estado comercial, evidenciando el aporte del postratamiento térmico en función de la dureza y la tasa de desgaste. Patiño, *et al.* (2016) [7], evaluaron la influencia del templado y el efecto de tres fluidos refrigerantes diferentes (agua, aceite, agua+sal+hielo)

durante el tratamiento térmico, en la microestructura y dureza en muestras de AISI 1045. Los resultados demostraron que la muestra templada con agua+sal+hielo presento el mayor valor de dureza (57.1 HRC), con un pequeño tamaño de grano. Pinzón & Ramos (2016) [8], llevaron a cabo una investigación para determinar qué efectos podría tener los procesos de temple, criogenia y revenido en las propiedades mecánicas del acero SAE 1045, y cómo estos cambios podrían influir en su aplicación en distintos contextos industriales. Los resultados obtenidos indicaron que el tratamiento criogénico no tuvo un impacto significativo en las propiedades mecánicas del acero evaluado, mientras que la combinación de temple y revenido resultó en mejoras considerables en la tensión, tenacidad y dureza del material. León-Thomas *et al.*, (2018) [9], establecieron el comportamiento de la curva esfuerzo-deformación del acero AISI 1045 deformado utilizando un rodillo simple. Para el desarrollo de la investigación se utilizó la técnica de diseño de experimentos considerando tres variables que influyen en la deformación de los materiales utilizando un rodillo (Avance, revoluciones y fuerza), los resultados obtenidos demostraron que las muestras aumentan las tensiones de 674 a 926 MPa.

Li & Peng, (2017) [10], estudiaron los efectos del endurecimiento por deformación en la aleación AISI 316L bajo diferentes porcentajes de la zona de endurecimiento. Los resultados demostraron que los límites elásticos aumentan con la magnitud del endurecimiento por deformación de los materiales. Asimismo, las ecuaciones teóricas de Ramberg se pueden utilizar para predecir las curvas de esfuerzo-deformación de los materiales, concordando con los obtenidos experimentalmente. Mukarati *et al.* (2020) [11], desarrollaron relaciones matemáticas que describen el endurecimiento por deformación en función de la temperatura (hasta 75°C) en una aleación AISI 301L. Los resultados demostraron que las relaciones matemáticas describen el comportamiento de los materiales auténticos en función de la deformación generada durante el ensayo [12]. Por otra parte, investigadores han desarrollado mapas sobre la influencia del endurecimiento por deformación en materiales como es el caso Upadhyay (2015) [13], analizó cómo el proceso de laminación en frío afecta las propiedades mecánicas del acero tipo estructural S355 de bajo contenido de carbono. Muestras sometidas al proceso de laminación en frío con diferentes tasas de trabajo, recocidos a una temperatura de 400°C durante 1 h fueron utilizadas para el desarrollo de los ensayos experimentales. Se realizaron análisis de la microestructura del acero S355 antes y después del tratamiento de laminación en frío para caracterizar el material, considerando la resistencia máxima a la tracción, tenacidad y dureza.

Los resultados mostraron que el aumento en la reducción del espesor de la muestra del 0 al 30% aumenta significativamente la resistencia a la tracción y la tenacidad del material. Además, la observación microscópica reveló la modificación microestructural en el material, con alargamiento y compresión de granos, contribuyendo al aumento de las propiedades mecánicas evaluadas. Li *et al.* (2021) [14] investigaron el efecto del endurecimiento por deformación en las propiedades mecánicas del acero inoxidable austenítico S30408, para evaluar la calidad de los recipientes a presión. Los autores realizaron pruebas de tracción en muestras de acero inoxidable S30408 que habían sido sometidas a diferentes porcentajes de endurecimiento por deformación. Los resultados evidenciaron que el límite elástico, la resistencia a la tracción y la dureza del material aumentaban con el aumento del porcentaje de endurecimiento por deformación. Sin embargo, la ductilidad del material disminuyó con el aumento de los niveles de endurecimiento por deformación. Vinoth-Kumar, *et al.* (2017) [15], investigaron las propiedades de tracción en caliente y el comportamiento de endurecimiento por deformación del acero inoxidable 304HCu. Las pruebas se realizaron a diferentes velocidades de deformación para investigar el efecto de la temperatura y la velocidad de deformación en las propiedades de tracción del material. Los resultados del estudio revelaron que el acero inoxidable 304HCu exhibe buenas propiedades de tracción en caliente y ductilidad a altas temperaturas. También se encontró que el comportamiento de endurecimiento por deformación del material era significativo, lo que indica la capacidad del material para resistir la deformación en condiciones de alta temperatura.

Song, *et al.* (2014) [16], estudiaron el efecto del endurecimiento por deformación en aceros inoxidables austeníticos de alto contenido de Manganeso. Los autores analizaron cómo los elementos de aleación, velocidad de deformación y la temperatura de deformación afectan el comportamiento del endurecimiento por acritud, realizando un estudio detallado de la microestructura de los aceros austeníticos después de diferentes niveles de deformación. Los resultados mostraron que el contenido de Mn tiene un gran impacto en el endurecimiento en frío en los aceros, los cuales se pueden controlar a través de la adición de otros elementos de aleación, como Ni y Cu, con la finalidad de obtener un comportamiento de endurecimiento por deformación deseado en los aceros austeníticos de alto contenido de Mn para aplicaciones específicas. De Mello, *et al.* (2017) [17], investigaron el efecto de la resistencia a la abrasión de un material bajo endurecimiento por deformación. Los autores analizaron dos tipos de aceros, considerando

diferentes porcentajes de deformación por tracción, los cuales fueron ensayados mediante desgaste abrasivo. Los resultados muestran que el endurecimiento por deformación puede aumentar la resistencia a la abrasión de los aceros, el cual depende del tipo de acero y del porcentaje de deformación con buena correlación entre el endurecimiento por deformación y la resistencia a la abrasión, los cuales se ven afectados por la microestructura del material y su composición química. Gupta, *et al.* (2015) [18], desarrollaron pruebas de laboratorio para investigar la relación entre la deformación plástica y el endurecimiento por deformación en varias aleaciones de aluminio y titanio utilizadas en la industria aeroespacial. Los resultados mostraron que las aleaciones de aluminio y titanio experimentan un endurecimiento por deformación significativo cuando se someten a deformaciones plásticas. Además, encontraron que las aleaciones con granos más pequeños y una tasa de deformación más alta experimentan un mayor endurecimiento por deformación.

Jiang, *et al.* (2021) [19], describieron un método sostenible para endurecer aceros martensíticos de ultra alta resistencia al manipular la interacción entre diferentes defectos de red cristalina. La rápida precipitación de nanoprecipitados ordenados de Ni (Al-Fe) con baja discordancia evita la recuperación de las dislocaciones de temple convencional. Durante la deformación plástica, el alto estrés de corte creado por los nanoprecipitados ordenados permite que muchas dislocaciones retenidas se vuelvan móviles en un modo plano, promoviendo el refinamiento de la banda como el mecanismo principal de endurecimiento por deformación. Como resultado, la resistencia a la fluencia y la elongación a la falla se incrementaron simultáneamente. Hui, *et al.* (2016) [20], investigaron los efectos del estirado en frío y del recocido en la fragilización por hidrógeno de un acero bainítico endurecido en frío (Mn-B-Ti type). Los autores realizaron ensayos de slow strain rate test (SSRT) y espectrometría de desorción térmica (TDS) para evaluar la resistencia a la fragilización por hidrógeno en entornos de servicio de pernos de alta resistencia fabricados con este acero. Los resultados del estudio indicaron que el endurecimiento por deformación debido al estirado en frío aumentó significativamente la susceptibilidad al hydrogen embrittlement (HE) debido a la absorción de hidrógeno difusible, la aparición de martensita inducida por deformación y un aumento en la resistencia. Sin embargo, los recocidos después del estirado en frío hallaron que era una forma efectiva de mejorar el desempeño de HE. Chen, *et al.* (2018) [21], investigaron el comportamiento de endurecimiento por deformación y nanocristalización en el acero Hadfield sometido a deformación plástica severa

superficial (SSPD). Los autores utilizaron una combinación de tratamiento de desgaste mecánico de superficie (SMAT) y granallado para someter el acero Hadfield a SSPD. Luego se realizaron pruebas de tracción para evaluar el comportamiento de endurecimiento por deformación del acero tratado. Los resultados mostraron que el tratamiento SSPD aumentó la resistencia y ductilidad del acero, así como su capacidad de endurecimiento por deformación. Además, el tratamiento SSPD condujo a la formación de granos nanocristalinos con un tamaño promedio de 50 nm. Se encontró que el refinamiento del grano se debía a las dislocaciones de alta densidad generadas durante el tratamiento con SSPD.

Considerando lo anterior, el propósito de este trabajo de investigación experimental es evaluar el comportamiento del endurecimiento por deformación de los aceros grado AISI (1045 and 304) y la influencia de los tratamientos térmicos de temple y recocido (para relajar esfuerzos) utilizando una maquina universal, con la finalidad de determinar mediante ensayos de tensión la curva esfuerzo-deformación de cada metal. El endurecimiento por deformación se llevó a cabo con variaciones del 5, 10 y 20 %, y de esta manera aumentar el tiempo de vida útil de componentes mecánicos utilizando técnicas convencionales de bajo costo.

2. Materiales y métodos

Inicialmente se llevó a cabo la selección de materiales considerando las muestras de acero AISI 1045 y 304, luego utilizo el software estadístico Statgraphics para obtener el diseño de experimentos (DOE) adecuado a partir de los diferentes tratamientos térmicos (Original=O, temple=T, y recocido=R) y porcentajes de endurecimiento por deformación (0, 20 y 40%). Posteriormente las muestras fueron maquinadas considerando la norma ASTM-E8, la cual establece la geometría de las muestras y posteriormente desarrollar el ensayo de tensión en la maquina universal. Finalmente, los datos obtenidos las curvas de esfuerzo por deformación fueron graficados y analizados para establecer de forma adecuada los porcentajes de endurecimiento. Nótese que, durante ensayos previos, valores mayores al 60% de endurecimiento por deformación (%SH), que en algunos casos lleva a la falla de la muestra, por lo que no se excedió el valor.

2.1. Diseño experimental

Para cada acero (AISI 1045 y AISI 304) con sus respectivos tratamientos térmicos, se realizaron 3 ensayos sin variación del porcentaje de endurecimiento por deformación (0% SH) para estimar la zona de endurecimiento por deformación de los materiales. Para el acero AISI 1045 se utilizaron 27 muestras (9-O, 9-T, y 9-R) con 0, 20 y 40% de SH.

Asimismo, para el acero AISI 304 se utilizaron 18 muestras, (9-O, 0-T-No aplica, y 9-R) con 0, 20 y 40% de SH, es importante mencionar que se llevaron a cabo 3 repeticiones cada una de las condiciones para garantizar la validez estadística de los resultados. Nótese que el acero AISI 1045 presenta medio contenido de carbono que se utiliza comúnmente en aplicaciones de endurecimiento por inducción o superficial, este acero tiene una baja velocidad de enfriamiento rápido durante el temple lo que no se logra un cambio en la estructura cristalina del material.

2.2. Tratamientos de temple y recocido.

Para el caso de componentes metálicos que son sometidos a temple, es importante considerar la temperatura de austenización, con la finalidad de transformar a un acero más duro y resistente. La muestra debe adquirir la microestructura, la dureza, la resistencia o la tenacidad necesarias durante el tratamiento térmico de temple para lograr las mejores propiedades para un acero templado y revenido, al mismo tiempo que se minimiza la tensión residual, la distorsión y el riesgo de fractura. La cantidad de carbono y el porcentaje de martensita que se produce determinan la dureza final [22].

En la práctica del temple influyen factores como: 1) Las dimensiones de la pieza. Una pieza más gruesa requiere un ciclo de calentamiento y enfriamiento prolongado. 2) La composición química del acero. Generalmente, los elementos de aleación facilitan el templado. 3) Tamaño de grano. La velocidad crítica de templado está influenciada principalmente por el tamaño de grano, siendo el grano grueso el que tiene una mayor templabilidad, y 4) Medio de enfriamiento. El que alcanza una velocidad de templado un poco más alta que la crítica es el mejor para templar acero. Los medios más utilizados son: aire, aceite, agua, plomo, mercurio, sales fundidas y polímeros hidrosolubles [23]. On the other hand, annealing is exposed to a una temperatura en la que "el material se convierte en austenita y seguidamente, se enfría de manera paciente (hasta 500 °C)". El resultado es que la austenita se convierte en perlita y ferrita de grano grueso. Luego se enfría al aire [24].

Las temperaturas y los tiempos de exposición de los aceros para el desarrollo de los diferentes tratamientos térmicos en el laboratorio se muestran en la Tabla 1. Para el acero AISI 1045 en el tratamiento de temple, se precalentó el acero a una temperatura de 850 °C durante 30 min y luego enfriado en agua. Para el tratamiento de recocido, se calentó el acero a una temperatura de 850 °C durante 60 min y luego enfriado lentamente en el horno.

Asimismo, para el acero AISI 304 en el tratamiento de recocido, se sometió a calentamiento a una

temperatura de 1,100°C, con 30 min de exposición, y enfriamiento rápido en agua. Como se mencionó, debido a la similar transformación de fases durante el temple y recocido, solo se llevó a cabo el recocido a las muestras de acero AISI 304.

Tabla 1. Temperaturas y tiempos de exposiciones para el desarrollo de los diferentes tratamientos térmicos.

Ace ro	Temperat ura (°C) - Temple	Tiem po (min) - Temp le	Método de enfriamie nto	Temperat ura (°C) - Recocido	Tiemp o (min) - Recoci do	Método de enfriamie nto
AISI 1045	815-870	30	Agua aceite	815 - 885	60	Enfriarlo lentament e en horno
AISI 304	-	-	-	1,000 1,100	- 30	Agua aceite

Fuente: [25].

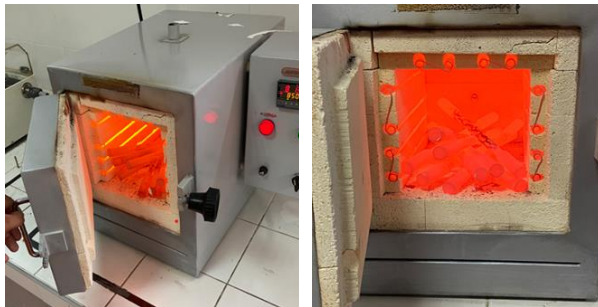
En la Tabla 2 se muestran los diferentes tratamientos térmicos considerando la cantidad de muestras para el desarrollo experimental de este trabajo de investigación, con un total de 45 considerando las repeticiones del ensayo de tensión en la maquina universal.

Tabla 2. Tratamientos térmicos aplicados a las muestras de aceros grado AISI 304, 1045.

Acero	Tratamiento térmico	Cantidad de muestras
AISI 304	Original	9
AISI 304	Recocido	9
AISI 1045	Original	9
AISI 1045	Temple	9
AISI 1045	Recocido	9
Total		45

Por otra parte, la Figura 1 muestra los tratamientos térmicos aplicados a cada una de las muestras bajo las diferentes condiciones utilizando un horno tipo mufla marca Pinzuar, considerando el diseño experimental de la Tabla 2.

Figura 1. Tratamientos térmicos aplicados a las muestras de los diferentes aceros.



2.3. Hardness measurements

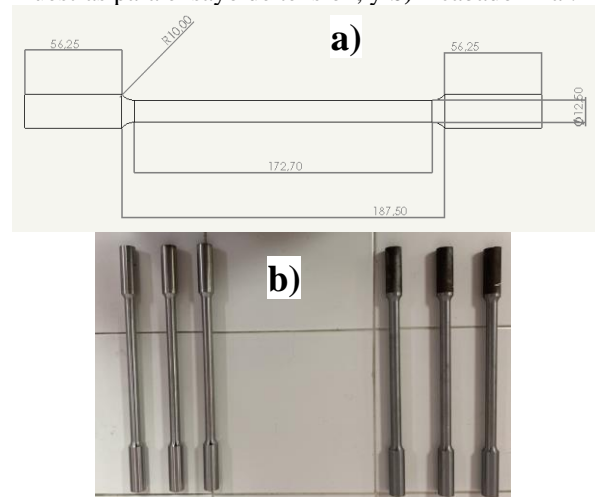
Las propiedades mecánicas de los aceros grado AISI (1045-304) considerando las diferentes condiciones

experimentales de la Tabla 2, fueron desarrollados bajo la norma ASTM E-18 y ASTM-E8M con la finalidad de determinar la dureza y obtener la curva esfuerzo-deformación (resistencia a la tracción, la resistencia a la fluencia, carga máxima soportada, porcentaje de deformación). Para este propósito, se utilizó un durómetro Mitucoyo HR-430 con una carga aplicada de 100 Kg para obtener un valor de dureza Rockwell B de las muestras [26]. Tenga en cuenta que al menos 3 mediciones de dureza fueron tomadas para garantizar la validez de los resultados obtenidos. Por otra parte, la microestructura de las muestras fue observada mediante un lente claro utilizando un Microscopio óptico Optiks-600X.

2.4. Ensayo de tensión

Los ensayos de tensión fueron realizados en una Maquina Universal Pinzuar 50K at 23 °C room temperature and 49% of relative humidity, cumpliendo con las especificaciones (medidas y geometría) propuestas en la norma ASTM-E8M [27], como se muestra en la Figura 2. Los datos geométricos de las muestras fueron incorporados al software del equipo considerando una longitud calibrada de 187.5 mm, el diámetro de 12.5 mm, longitud total (300 mm) y velocidad de avance (0.5 mm/min). Tenga en cuenta que las muestras de los aceros fueron mecanizadas en un centro de mecanizado considerando una geometría circular: G: Longitud de calibre=62.5 mm, D: Diámetro=12.5 mm, R: Radio del filete=10mm y A: Longitud de sección reducida=172.7 mm.

Figura 2. Muestras de aceros. a) Geometría de las muestras para ensayo de tensión, y b) Acabado final.



2.5. Strain hardening percentages

En esta actividad se estimaron los esfuerzos y deformaciones que se presentaron en la región de endurecimiento por deformación para evaluar los diferentes aceros en su estado original. Esta información es importante para establecer la

comparación con los aceros tratados térmicamente y determinar el efecto de los tratamientos en las propiedades mecánicas de los materiales. Los esfuerzos y deformaciones que se estimaron en la zona de endurecimiento por deformación para evaluar los diferentes aceros en su estado original y con tratamientos térmicos de temple y recocido en la máquina universal y de esta forma analizar el efecto en sus propiedades mecánicas, como se muestra en la Tabla 3.

Tabla 3. Esfuerzos y deformaciones aplicados a los aceros AISI 1045 y 304 para llevar al 20 y 40% de SH.

Acero		%SH	Esfuerzos necesarios (MPa)
AISI 1045	O	20	±435.558
		40	±494.936
	T	20	±748.644
		40	±792.288
	R	20	±425.002
		40	±452.004
AISI 304	O	20	±284.917
		40	±339.834
	R	20	±265.328
		40	±354.744

3. Resultados y discusiones

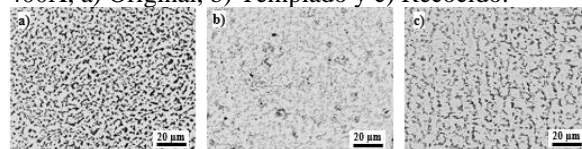
3.1. Preparación metalográfica

Inicialmente las muestras de acero AISI (1045-304) fueron preparadas mediante metalografía convencional (empaquetado, lijado, pulido) teniendo en cuenta los parámetros de la norma ASTM E3-11 [28]. Para revelar las microestructuras de los materiales bajo los diferentes tratamientos se consultó la norma ASTM E-407 [29], la cual sugiere el uso de ácido nítrico y ácido clorhídrico (agua regia) por 30 s para el acero AISI 304 y para el caso del acero AISI 1045 ácido nítrico y alcohol etílico (Nital al 2%) por 15 s. Es importante mencionar que la comparación de las microestructuras se llevó a cabo con ayuda del ASM Handbook con la finalidad de tener una visión más profunda sobre las propiedades y el comportamiento de cada tipo de acero bajo las diferentes condiciones experimentales, siendo de gran importancia para su uso en diversas industrias y aplicaciones donde se especifiquen las propiedades necesarias. Conocer cómo estos factores influyen en la estructura y propiedades de los aceros nos permite optimizar su rendimiento y asegurar su uso adecuado en una amplia gama de proyectos y productos.

En la Figura 3 se muestra la microestructura del acero AISI 1045 sometido a los diferentes tratamientos térmicos. La Figura 3a muestra una estructura perlítica-ferrítica en el acero AISI 1045-O, lo cual brinda buena resistencia mecánica con tenacidad y ductilidad, lo que lo hace adecuado para una variedad de aplicaciones industrial, como, por ejemplo:

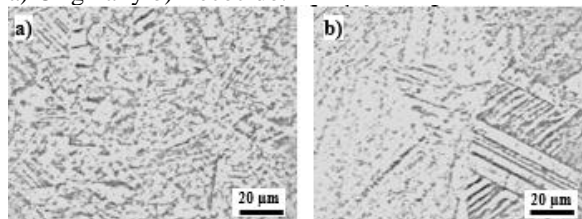
componentes estructurales, ejes, engranajes y otras piezas que requieran una combinación de resistencia y capacidad de deformación. En la Figura 3b, se evidencia una estructura martensita debido a este tratamiento térmico de temple, la transformación de las fases perlítica-ferrítica a martensítica proporciona al material mejoras en propiedades como: la resistencia mecánica, la tenacidad, entre otras, pero reduce la capacidad del material a tener deformaciones plásticas. Finalmente, en la Figura 3c se pudo observar que la microestructura del acero AISI 1045-R, y sin un tratamiento térmico de temple previo es en mayor medida perlítica con granos de ferrita. El recocido del acero AISI 1045 puede proporcionar beneficios como la relajación de esfuerzos internos, una mayor trabajabilidad, mejora en la maquinabilidad y una mayor tenacidad.

Figura 3. Microestructura del acero AISI 1045 a 400X, a) Original, b) Templado y c) Recocido.



En la Figura 4, muestra la microestructura del acero AISI 304-O y 304-R. Fue posible observar la aparición de maclas, presencia de carburos de cromo y el crecimiento de grano de en la microestructura del acero AISI 304 con tratamiento térmico de recocido. La aparición de las maclas es atribuida a la deformación plástica y crecimiento del tamaño de grano. De acuerdo con Sáenz, et al., (2007), la presencia de carburos de cromo sobre las maclas trae como consecuencia el endurecimiento del material, y por lo tanto, su fragilización. Sin embargo, aparecen en pequeñas zonas del material. También, se puede observar un crecimiento de grano austenítico y una disminución de los carburos [30]. Con el tratamiento térmico de recocido, los carburos que permanecen en los límites de grano, los cuales se desplazaron hacia la matriz austenítica dejando los carburos libres dentro del grano, y como consecuencia, su ablandamiento.

Figura 4. Microestructura del acero AISI 304 a 100X a) Original y b) Recocido.



3.2. Resultados de dureza.

En la Tabla 4 se representan los valores de las durezas de las cinco medidas y promedios de las muestras de

los aceros grado AISI 1045 y 304) en su estado original, con sus respectivos tratamientos térmicos bajo la norma ASTM E-18. La diferencia de durezas entre la muestra del acero AISI 1045-T y AISI 1045-R con respecto a su estado original es de 531.48 y 142.5 MPa con un aumento de dureza del 86.58 y 23.21%, respectivamente. El tratamiento térmico de temple aumenta la dureza del acero AISI 1045 debido a la formación martensítica. Durante el temple, el acero se calienta a una temperatura alta y luego se enfría rápidamente. Esto promueve la transformación de la estructura cristalina original en martensita, que es una fase metaestable de alta dureza. Esta transformación estructural resulta en un aumento significativo de la dureza, como se refleja en el aumento del 86.58% en comparación con el estado original. Por otro lado, el tratamiento térmico de recocido disminuye la dureza del acero AISI 1045. Durante el recocido, el acero se calienta a una temperatura específica y se enfría lentamente. Este proceso permite la relajación de tensiones internas y la formación de granos más grandes en la estructura del acero. Estos cambios reducen la dureza del material, lo que explica la reducción del 23.21% en comparación con el estado original.

Por otra parte, la diferencia de dureza entre la muestra del acero AISI 304-R con respecto a su estado original es de 92.4 MPa con una reducción de dureza es del 16.35%, respectivamente. El tratamiento térmico de recocido afecta significativamente la dureza del acero inoxidable AISI 304 debido a que en este proceso se permite la eliminación de tensiones residuales, la recristalización y, en algunos casos, la formación de carburos, lo que resulta en una disminución de la dureza del material como se observó en la Figura 4. Sin embargo, es importante destacar que el recocido también mejora la ductilidad y la resistencia a la corrosión del AISI 304, lo que lo hace más adecuado para aplicaciones específicas donde la dureza no es el factor principal.

Tabla 4. Valores de dureza y la microestructura de cada muestra de acero grado AISI.

Tipo de acero	Tratamiento térmico	Valor de dureza promedio (MPa)	Microestructura observada
1045	O	613.80 ± 4.99	Perlitica-ferritica
	T	1,145.28 ± 8.76	Martensitica
	R	471.30 ± 3.98	Perlitica-ferritica
304	O	565.16 ± 4.10	Austenitica
	R	472.76 ± 3.35	Austenitica

3.3. Resultados del ensayo de tensión.

Los porcentajes de endurecimiento por deformación (20 y 40% SH) fueron estimados para cada uno de los aceros y de esta manera se lograron obtener nuevas curvas de esfuerzo. Esto implicó el análisis de la curva de esfuerzo-deformación de los aceros grado AISI 1045 y 304 en su estado original, temple y recocido, con la finalidad de identificar las zonas de endurecimiento por deformación, y el cálculo de los porcentajes correspondientes. Es importante mencionar que la zona de endurecimiento por deformación está limitada entre el valor de la fluencia máxima y el valor del esfuerzo máximo, se analizaron estos valores para sacar un valor aproximado del porcentaje de endurecimiento en términos de esfuerzo (MPa).

Según el análisis de las curvas esfuerzo-deformación de los aceros llevados a la fractura/falla, los esfuerzos aproximados aplicados a las muestras de acero AISI (1045-304) para llevar la zona de endurecimiento por deformación a un 20 y 40% de endurecimiento, son los que se muestran en la Tabla 6. Los datos obtenidos representan los esfuerzos aproximados a los que se someten los materiales durante el ensayo de endurecimiento por deformación en la máquina universal. Estos esfuerzos corresponden al 20 y 40% de endurecimiento por deformación y se aplican para endurecer los materiales antes de llevarlos a la fractura. The calculations demonstrate how the total stress varies with increasing strain hardening capacity (SH) at different levels of plastic deformation for each type of steel and condition. This data is important for understanding how materials behave under load and how they can be effectively utilized in engineering applications. Additionally, it provides valuable information for material selection and structural component design.

Tabla 5. Cálculo de los esfuerzos aproximados para el SH de las muestras.

Acer o	Es fu er zo de flu en cia m áx im a (M Pa)	Es fu er zo a la tr ac ción m áx im o (M Pa)	T ot al (M P a)	%SH (MPa)		Esfuerzo para el SH (MPa)	
				20%	40%	20%	40%
A	37	67	2	(296.1	(296.1	376.18	376.18
I	6.1	3.0	9	8×20%	8×40%	+59.78	+118.7
S	8	7	6.)=59.7)=118.	≈435.5	5≈494.

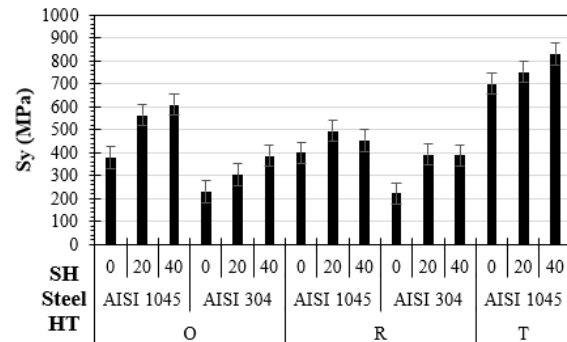
I 1 0 4 5				1 8	8	75	5	93
	T	70 0.0 0	94 3.2 2	2 4 3. 2 2 2	(243.2 2×20%)=48.6 4	(243.2 2×40%)=97.2 8	700.01 +48.64 ≈748.6 4	700.01 +97.28 ≈797.2 8
	R	39 8.0 0	53 3.0 0	1 3 5. 0 0 0	(135.0 0×20%)=27.0 0	(135.0 0×40%)=54.0 0	398.00 +27.00 ≈425.0 0	398.00 +54.00 ≈452.0 0
A I S I 3 0 4	O	23 0.0 0	50 4.5 8	2 7 4. 5 8	(274.5 8×20%)=54.9 1	(274.5 8×40%)=109. 83	230.00 +54.91 ≈284.9 1	230.00 +109.8 ≈339. 83
	R	22 0.6 2	44 4.1 6	2 2 3. 5 4	(223.5 4×20%)=44.7 0	(223.5 4×40%)=89.4 1	220.62 +44.70 ≈265.3 2	220.62 +89.41 ≈354.7 4

Por otra parte, analizando la resistencia a la tracción como se muestra en la Figura 5, el acero AISI-1045-O, sin SH muestra una resistencia a la tracción inicial alta, con un esfuerzo máximo de 673.7 MPa. Esto indica que el acero AISI 1045 es un material robusto y resistente en su estado original, por lo que al aplicar un 20 y 40% de SH, se observa un aumento gradual en el esfuerzo máximo. Sin embargo, con el aumento del endurecimiento, el acero AISI 1045 conserva una resistencia considerable, con valores de esfuerzo máximo de 698.755 y 724.64 MPa respectivamente. Esto indica que el SH puede mejorar la resistencia del acero AISI 1045 en cierta medida, específicamente en un 3.59 y 7.03%, respectivamente. En general, el acero AISI 304 muestran una resistencia más baja en comparación con el acero AISI 1045, encontrándose en aproximadamente 504.58 MPa en su estado original y en 538.36 y 557.2 MPa para un SH del 20 y 40% respectivamente. Sin embargo, es importante tener en cuenta que los aceros AISI 304 son aceros inoxidables austeníticos y están diseñados principalmente para resistir la corrosión, no para aplicaciones de alta resistencia y de uso en elementos mecánicos. A pesar de su menor resistencia, los aceros AISI 304 ofrecen una resistencia suficiente en diferentes condiciones de endurecimiento por deformación.

Analizando el comportamiento de la resistencia a la fluencia en cada uno de los aceros ensayados, se observó que para el acero AISI 1045, el endurecimiento por deformación tiene un efecto significativo en su resistencia a la deformación plástica. En comparación con el acero AISI 1045-O, tanto el acero AISI 1045-T y AISI 1045-R muestran un aumento en la fluencia máxima en todas las proporciones de SH. El acero AISI 1045-T presenta la mayor fluencia máxima, alcanzando valores de hasta 830.14 MPa con un 40% de SH, aumentando en un

15.68 % la resistencia a la fluencia en comparación con el acero AISI 1045-O sin SH.

Figura 5. Comportamiento del esfuerzo de fluencia.

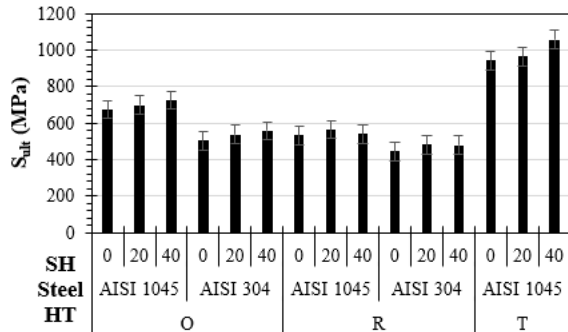


Al comparar el acero AISI 1045 y el acero AISI 304 en diferentes estados (T y R), se observa en la Figura 6 que el SH tiene un impacto relevante en el acero AISI 1045 que en el AISI 304. El AISI 1045R para un 40% de SH muestra un aumento en la resistencia última en comparación con el acero AISI 1045-T y AISI 1045-O, este aumento en la resistencia es de aproximadamente 10.62%. Por otro lado, los aceros AISI 304-O y AISI 304-R original, al igual que los aceros AISI 1045-T, también experimentan aumentos en la resistencia a la tracción máxima al ser sometidos a 40% de SH, este aumento es de 9.45 y 7.14 % aproximadamente. Según Kaishang y Peng (2017), demostraron la importancia y la influencia del endurecimiento por deformación en la resistencia a la tracción máxima de diferentes aceros, donde el comportamiento de la resistencia ultima vario muy significativamente. En nuestro estudio se observó un aumento significativo en el esfuerzo máximo a tracción con el endurecimiento, los aceros estudiados, tanto el acero AISI 1045 como el acero AISI 304, conservaron una resistencia adecuada en diferentes niveles de endurecimiento por deformación. Estos resultados respaldan la viabilidad de utilizar el endurecimiento por deformación como un método efectivo para mejorar las propiedades mecánicas de los aceros estudiados en aplicaciones donde la resistencia y la dureza son factores clave [10].

En cuanto al acero AISI 304, también se observó un incremento del esfuerzo ultimo con el SH. El acero AISI 304-R con SH, presentaron valores de fluencia máxima más altas en comparación con el acero AISI 304 sin SH. Sin embargo, la diferencia en los valores de fluencia máxima es menor en comparación con el acero AISI 1045 en todos sus estados. El acero AISI 304-T sin SH mostró una menor fluencia máxima en comparación con el acero AISI 304-O sin SH, esta disminución fue de 4.08% aproximadamente. Según Kaishang y Peng (2017), determino que el SH mejora la resistencia a la deformación plástica en aceros y

aleaciones. Sin embargo, los aceros con temple muestran una mayor respuesta al SH en comparación con los aceros recocidos [10].

Figura 6. Comportamiento del S_{ult} .



4. Conclusiones

Los valores de dureza y las microestructuras observadas analizadas evidencian que el acero AISI 1045 tratado térmicamente (T) presenta la dureza promedio más alta ($1,145.28 \pm 8.76$ MPa) entre todas las condiciones y tipos de acero. Esto indica que la microestructura martensítica lograda mediante el tratamiento térmico contribuye a mejorar significativamente las propiedades de dureza en comparación con las condiciones recocidas (O) y laminadas en frío (R) del acero AISI 1045.

El tratamiento térmico de recocido redujo la dureza del acero AISI 304 y AISI 1045 significativamente. Por otro lado, el tratamiento térmico de temple aumentó significativamente la dureza del acero AISI 1045 debido a la formación de martensita. El acero AISI 1045-T exhibió la mayor resistencia a la tracción y resistencia a la fluencia en comparación con los otros aceros y sus diferentes estados, la cual se vieron favorecidas por el endurecimiento por deformación. El endurecimiento por deformación afectó negativamente el comportamiento de la carga máxima soportada por cada acero, debido a que hicieron que los materiales se volvieran más rígidos por el endurecimiento de las dislocaciones y perdieran la capacidad de soportar la máxima carga la antes de sufrir una fractura o falla. Los aceros AISI 1045 y 304 recocidos tuvieron la mayor deformación unitaria, pero esta disminuyó al aplicarles el endurecimiento por deformación, quiere decir que el endurecimiento por deformación afecta negativamente la deformación unitaria debido a la creación de dislocaciones.

El endurecimiento por deformación puede afectar tanto positivo como negativamente las propiedades mecánicas de los materiales, es por esto que tenemos que tener claro la aplicación a la que queremos someter a los materiales antes de aplicarles cualquier técnica de endurecimiento.

5. Referencias

- [1] L. F. Vargas Cubillos, "Influencia del tratamiento termico de recocido sobre la microestructura, dureza y atenuación ultrasónica de aceros inoxidables AISI 304," Universidad Libre, 2015.
- [2] H. Rodríguez Galbarro, "Estudio y Clasificación de los Aceros," *WebPage*, 2023. https://ingemecanica.com/tutorialsemanal/tutorialn101.html#google_vignette (accessed Dec. 12, 2023).
- [3] R. A. García-León, N. Afanador-García, and G. Guerrero-Gómez, "A Scientometric Review on Tribocorrosion in Hard Coatings," *J. Bio- Tribo-Corrosion*, vol. 9, no. 2, p. 39, 2023, doi: 10.1007/s40735-023-00759-4.
- [4] P. W. Alexander and R. R. William, "Análisis de las propiedades mecánicas de tensión, tenacidad y dureza de un acero sae 1045 mediante los procesos de tratamiento termico de temple, criogenia y revenido," Universidad Distrital Francisco José de Caldas, 2017.
- [5] E. Guerrero Lara, "Estudio de los tratamientos térmicos en el acero AISI 1045 en un sistema acuoso evaluados con la norma ASTM G105 que permitirá determinar la velocidad de desgaste del material," Universidad Técnica de Ambato - Ecuador, 2015.
- [6] E. Pérez-Ruiz, J. Llano-Martínez, and J. Ravagli-Reyes, "Estudio del grado de endurecimiento y resistencia al desgaste por deslizamiento del acero AISI 1045 endurecido por temple con refrigerante automotriz y para mecanizado," *Rev. UIS Ing.*, vol. 18, no. 2 SE-Artículos, pp. 113–120, Feb. 2019, doi: 10.18273/revuin.v18n2-2019010.
- [7] H. Patiño Duque and B. Rosero Coral, "Tratamiento térmico de temple, influencia del medio de enfriamiento," *J. Cienc. e Ing.*, vol. 8, no. 1, pp. 52–58, Jul. 2016, [Online]. Available: <https://jci.uniautonoma.edu.co/2016/2016-7.pdf>.
- [8] W. Pinzón and G. Ramos, "Análisis de las propiedades mecánicas de tensión, tenacidad y dureza de un acero SAE 1045 mediante los procesos de tratamiento térmico de temple criogenia y revenido.," Universidad Distrital Francisco José de Caldas, 2016.
- [9] Y. León-Thomas, T. Fernández-Columbié, M. A. Cobas-Suárez, and M. A. Mosqueda-Castaño, "Curva tenso-deformacional del acero AISI-1045 endurecido por deformación plástica superficial con rodillo," *Cienc. Futur.*, vol. 8, no. 4, pp. 66–76, 2018.
- [10] K. Li and J. Peng, "Mechanical Behavior of 316L Stainless Steel after Strain Hardening,"

- MATEC Web Conf.*, vol. 114, no. 1, p. 02003, 2017, doi: <https://doi.org/10.1051/mateconf/201711402003>.
- [11] T. W. Mukarati, R. J. Mostert, and C. W. Siyasiya, "The sigmoidal strain hardening behaviour of a metastable AISI 301LN austenitic stainless steel as a function of temperature," *Mater. Sci. Eng. A*, vol. 792, p. 139741, 2020, doi: <https://doi.org/10.1016/j.msea.2020.139741>.
- [12] T. W. Mukarati, R. J. Mostert, and C. W. Siyasiya, "Development of a mathematical equation describing the strain hardening behaviour of metastable AISI 301 austenitic stainless steel," *IOP Conf. Ser. Mater. Sci. Eng.*, vol. 655, no. 1, p. 12008, 2019, doi: [10.1088/1757-899x/655/1/012008](https://doi.org/10.1088/1757-899x/655/1/012008).
- [13] 360-En-Concreto, "Un breve recorrido a la historia del cemento," *WebPage*, 2020. <https://360enconcreto.com/blog/detalle/recorrido-historia-del-cemento/#:~:text=El proceso de producci3n del,obteniendo un compuesto fuertemente cementante.>
- [14] L. Li, R. Wang, H. Zhao, H. Zhang, and R. Yan, "Combined effects of elevated temperatures and high strain rates on compressive performance of S30408 austenitic stainless steel," *Structures*, vol. 34, pp. 1–9, 2021, doi: <https://doi.org/10.1016/j.istruc.2021.07.063>.
- [15] M. Vinoth Kumar, V. Balasubramanian, and A. Gourav Rao, "Hot tensile properties and strain hardening behaviour of Super 304HCu stainless steel," *J. Mater. Res. Technol.*, vol. 6, no. 2, pp. 116–122, 2017, doi: <https://doi.org/10.1016/j.jmrt.2016.05.004>.
- [16] W. Song, T. Ingendahl, and W. Bleck, "Control of Strain Hardening Behavior in High-Mn Austenitic Steels," *Acta Metall. Sin. (English Lett.)*, vol. 27, no. 3, pp. 546–556, 2014, doi: [10.1007/s40195-014-0084-9](https://doi.org/10.1007/s40195-014-0084-9).
- [17] J. D. B. de Mello, W. S. Labiapari, M. A. N. Ardila, S. A. G. Oliveira, and H. L. Costa, "Strain Hardening: Can it Affect Abrasion Resistance?," *Tribol. Lett.*, vol. 65, no. 2, p. 67, 2017, doi: [10.1007/s11249-017-0850-8](https://doi.org/10.1007/s11249-017-0850-8).
- [18] R. K. Gupta and N. Birbilis, "The influence of nanocrystalline structure and processing route on corrosion of stainless steel: A review," *Corros. Sci.*, vol. 92, pp. 1–15, 2015, doi: <https://doi.org/10.1016/j.corsci.2014.11.041>.
- [19] S. H. Jiang *et al.*, "Strain hardening mediated by coherent nanoprecipitates in ultrahigh-strength steels," *Acta Mater.*, vol. 213, p. 116984, 2021, doi: <https://doi.org/10.1016/j.actamat.2021.116984>.
- [20] W. Hui *et al.*, "Influence of cold deformation and annealing on hydrogen embrittlement of cold hardening bainitic steel for high strength bolts," *Mater. Sci. Eng. A*, vol. 662, pp. 528–536, 2016, doi: <https://doi.org/10.1016/j.msea.2016.03.104>.
- [21] C. Chen, B. Lv, X. Feng, F. Zhang, and H. Beladi, "Strain hardening and nanocrystallization behaviors in Hadfield steel subjected to surface severe plastic deformation," *Mater. Sci. Eng. A*, vol. 729, pp. 178–184, 2018, doi: <https://doi.org/10.1016/j.msea.2018.05.059>.
- [22] R. Arregola-Herrera, "Efecto de la deformaci3n en fri3 sobre las propiedades mec3nicas de los aceros: DIN-32CrMoV12, AISI 4340 y AISI 8620," IPN, 2011.
- [23] W. A. Pinz3n and G. Ramos-Rosero, "An3lisis de las propiedades mec3nicas de tensi3n, tenacidad y dureza de un acero SAE 1045 mediante los procesos de tratamiento t3rmico de temple, criogenia y revenido," Universidad Distrital Francisco Jos3 de Caldas, 2017.
- [24] W. H. Vaca Ortega and E. S. Guerrero Lara, "Estudio de los tratamientos t3rmicos en el acero AISI 1045 en un sistema acuoso evaluados con la norma ASTM G105-89 que permitir3 determinar la velocidad de desgaste del material," Universidad T3cnica de Ambato, 2015.
- [25] ASM, *Volume 4. Heat Treating*, Metals-Han. United States of America, 1991.
- [26] ASTM-E18, "Standard Test Methods for Rockwell Hardness of Metallic Materials," *ASTM Int.*, vol. 1, no. 1, 2022, [Online]. Available: [10.1520/E0018-22](https://doi.org/10.1520/E0018-22).
- [27] ASTM-E8, "ASTM E8/E8M standard test methods for tension testing of metallic materials 1," *Annu. B. ASTM Stand.* 4, no. C, pp. 1–27, 2010, doi: [10.1520/E0008](https://doi.org/10.1520/E0008).
- [28] ASTM-E3-11, "Standard Guide for Preparation of Metallographic Specimens," *ASTM B. Stand.*, vol. 1, 2017, doi: [10.1520/E0003-11R17](https://doi.org/10.1520/E0003-11R17).
- [29] ASTM-E407-07, "Standard Practice for Microetching Metals and Alloys," *ASTM Int.*, vol. 1, 2015, doi: [10.1520/E0407-07R15E01](https://doi.org/10.1520/E0407-07R15E01).
- [30] L. S3enz Palencia, Y. Avenda3o, and K. Blanco, "Evaluaci3n microestructural del acero inoxidable austen3tico AISI 304 sometido a ensayos de Creep," *IngeCUC*, vol. 14, no. 2, pp. 42–49, 2007.