

Development and validation of a low-cost traction system for comparative characterization of traditional materials and biomaterials

Desarrollo y validación de un sistema de tracción de bajo costo para caracterización comparativa de materiales tradicionales y biomateriales

Fatima Joseline Arriola Patiño¹, Jorge Adrián Botello Rueda², Luis Mario Olmos Ortiz³, Laura Edith Castellano Torres⁴.
^{1,2,3,4} Departamento de Ingenierías Química, Electrónica y Biomédica, División de Ciencias e Ingenierías, Campus León, Universidad de Guanajuato, Lomas del Bosque No. 103, Colonia Lomas del Campestre, C.P. 37150, León, Guanajuato.
fj.arriolapatino@ugto.mx¹, ja.botello@ugto.mx², lm.olmos@ugto.mx³, laedcato@ugto.mx⁴

Resumen

En este proyecto se presenta el desarrollo y validación de una máquina universal de tracción de bajo costo diseñada para la caracterización de propiedades mecánicas de materiales tradicionales y biomateriales. La principal innovación radica en la accesibilidad del equipo, que demostró la capacidad para detectar variaciones significativas en las propiedades mecánicas inducidas por tratamientos térmicos y ambientales. Los resultados evidencian diferencias en la sensibilidad según el tipo de material: los biomateriales mostraron una marcada dependencia a las condiciones de humedad, mientras que los metales respondieron de manera consistente a los tratamientos térmicos. En conjunto, el sistema valida metodologías accesibles para la caracterización mecánica, con potencial de aplicación tanto en el desarrollo sostenible de materiales como en la formación en ingeniería. Además, lo convierte en una alternativa viable para instituciones educativas que no disponen de una máquina universal comercial.

Palabras clave: Máquina Universal, propiedades mecánicas, biomateriales, materiales tradicionales, tracción.

Introducción

La prueba de tracción es un ensayo mecánico ampliamente utilizado para analizar la respuesta de un material cuando se le aplica una fuerza de tracción, es decir, cuando se estira hasta su ruptura. Esta prueba permite determinar la resistencia, ductilidad y comportamiento elástico y plástico del material ^{3,5}. El ensayo de tracción consiste en aplicar una fuerza axial creciente sobre una probeta estandarizada, registrando el cambio de longitud y la fuerza desde el inicio hasta el final de la prueba. Con estos datos se construye la curva esfuerzo-deformación, que ilustra el comportamiento del material. Para obtener resultados confiables y reproducibles, se emplea una máquina universal estandarizada bajo normas como la ASTM E8/E8M ¹, que establece requisitos sobre dimensiones y geometría de las probetas, velocidad de aplicación de la carga, temperatura, alineación y métodos de cálculo. También existen normas específicas como la ISO 6892 ⁷ y la ASTM D638 ², que regulan condiciones de la probeta y ensayo adaptadas a estos materiales. En una prueba de tracción se pueden determinar diversas propiedades mecánicas, entre las que destacan:

- **Módulo de Young:** que es la pendiente de la zona elástica de la curva esfuerzo-deformación (Figura 1-3).
- **Límite o esfuerzo de fluencia:** es el esfuerzo a partir del cual el material comienza a deformarse plásticamente (Figura 1-3).
- **Esfuerzo máximo o resistencia última:** es el esfuerzo máximo que el material puede soportar antes de la reducción localizada de su sección (Figura 1-3).
- **Esfuerzo de ruptura:** es el esfuerzo en el que ocurre la fractura de la probeta (Figura 1-3).
- **Tenacidad:** es el área total bajo la curva esfuerzo-deformación, que representa la energía absorbida antes de la fractura (Figura 1-3).
- **Resiliencia:** es el área bajo la porción elástica de la curva, que indica la capacidad de absorber energía elástica (Figura 1-3)⁵.

En este trabajo se estudiaron materiales de uso común e interés biomédico agrupados en tres categorías principales metales, polímeros y biomateriales. Esto con el objetivo de desarrollar y validar un sistema de tracción de bajo costo para caracterización mecánica y de esta manera evaluar el efecto de tratamientos térmicos y ambientales en propiedades mecánicas y de manera adicional se cuenta con establecer la viabilidad del equipo para aplicaciones en biomateriales y contextos educativos. A continuación, se citan algunas características de estos tipos de materiales.

Los metales, como el acero y el cobre son ampliamente empleados en construcción, electrónica y componentes mecánicos por su resistencia y ductilidad. En este estudio, se investigó el efecto del recocido,

un tratamiento térmico destinado a aliviar tensiones internas, aumentar la ductilidad y promover el crecimiento de grano, modificando así la capacidad del material para deformarse plásticamente antes de fracturarse ^{3,4}.

En la Figura 1, se muestra la curva esfuerzo-deformación del acero galvanizado obtenida a partir de un ensayo de tracción realizado con la máquina universal de diseño propio; en ella se ilustran puntos importantes como el esfuerzo máximo y de ruptura, la sección plástica y elástica, así como el módulo de Young.



Figura 1. Curva esfuerzo-deformación de una muestra de acero galvanizado. Se observa la región elástica (en morado), la estimación del módulo de Young (pendiente roja) y la región plástica (en amarillo) hasta el punto de ruptura.

Los polímeros como el teflón, el polipropileno (mecate); y termoplásticos como la policaprolactona, son utilizados en aplicaciones que requieren flexibilidad, bajo peso y resistencia química. En este estudio se evaluó el impacto del reprocesado térmico (refundición) y exposición a la radiación ultravioleta, procesos que pueden provocar degradación de las cadenas poliméricas y pérdida de propiedades mecánicas⁵. En la Figura 2, se muestra la curva esfuerzo-deformación del polipropileno, en la que puede observarse como los puntos de esfuerzo máximo y de ruptura difieren cualitativamente respecto a la del acero galvanizado, así mismo, la relación entre regiones plásticas y elásticas son diferentes.

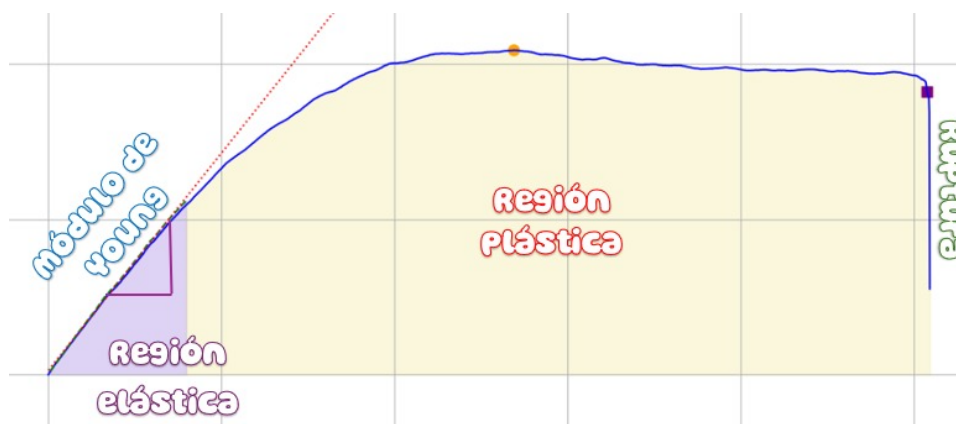


Figura 2. Curva esfuerzo-deformación de una muestra de mecate (polipropileno). Destaca una mayor elongación en la región plástica (amarillo) comparada con la región elástica inicial (morado), con indicación del módulo de Young (línea roja punteada) y el punto de ruptura.

Los biomateriales, incluyendo cabello humano e hilos de alginato, elegidos por su relevancia en aplicaciones médicas y de ingeniería de tejidos. El alginato se emplea como matriz para liberación controlada de fármacos o en andamiaje celular (aunque fue analizado, las pruebas obtenidas no fueron concluyentes o reproducibles, por lo que no se muestran en la sección de los resultados). El cabello humano, por su compleja estructura de queratina, sirve como modelo natural para estudiar el comportamiento mecánico dependiente de humedad y temperatura. Estas características hacen que estos materiales sean particularmente sensibles a tratamientos ambientales como hidratación, secado o variaciones en la velocidad de deformación. En la Figura 3 se observa la curva esfuerzo-deformación de una muestra de policaprolactona, mostrando la forma típica observada en las curvas anteriores.

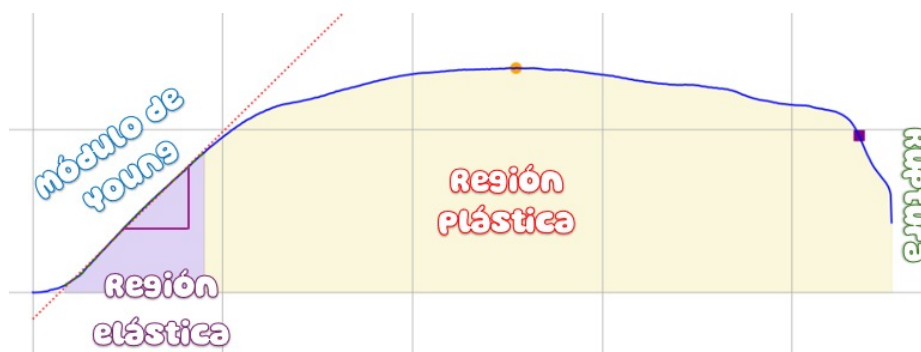


Figura 3. Curva esfuerzo-deformación de una muestra de termoplástico. Destaca una mayor elongación en la región plástica (amarillo) comparada con la región elástica inicial (morado), con indicación del módulo de Young (línea roja punteada) y el punto de ruptura.

En este estudio, se evaluaron distintos tratamientos y condiciones experimentales: tiempos variables de recocido en metales, número de ciclos de refundición en termoplásticos, exposición a luz ultravioleta en fibras sintéticas y procesos de hidratación o secado en biomateriales. Esto, con el propósito de inducir cambios estructurales, afectando así sus propiedades mecánicas y su desempeño esperado en aplicaciones reales.

Metodología

Descripción de la máquina universal

La máquina de tracción utilizada en este trabajo es de construcción propia y fue diseñada para alcanzar un equilibrio entre costo y desempeño. Sus dimensiones aproximadas son 36.5 cm de altura por 12 cm de ancho, lo que facilita su implementación y uso en laboratorios de docencia. El sistema incorpora dos motores a pasos y una celda de carga base, controlados mediante un sistema Arduino. Este diseño minimalista contrasta favorablemente con propuestas recientes, como la de Woods et al. (2024), que emplea componentes más complejos, o la de Salih et al. (2024), orientada específicamente al estudio de tejidos blandos.

La simplicidad de nuestro dispositivo lo convierte en una alternativa accesible para entornos educativos y proyectos de investigación con recursos limitados. Asimismo, la máquina cuenta con tres velocidades de prueba predefinidas, lo que permite su adaptación a distintos tipos de materiales. Finalmente, el procesamiento automático de datos mediante Python asegura una adquisición y análisis eficientes, equiparables a los sistemas de código abierto más avanzados reportados en la literatura.

En la base de la máquina se ubica la celda de carga, encargada de medir la fuerza aplicada a la muestra en términos de la carga soportada en kilogramos (Figura 4). No obstante, es importante señalar que no se llevó a cabo una caracterización formal ni una calibración certificada de la celda, lo que representa una limitación relevante en la precisión de las mediciones de fuerza. Esta restricción impacta particularmente en el cálculo de propiedades derivadas, como el módulo de Young, introduciendo una incertidumbre estimada de $\pm 8\%$ en los valores absolutos⁴.

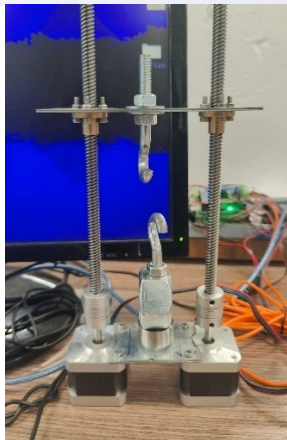


Figura 4. Máquina universal de tracción de diseño propio. Equipo construido para evaluar propiedades mecánicas básicas en un laboratorio de docencia. Emplea dos motores a pasos y un Arduino para controlar la velocidad del ensayo, con lectura de carga mediante celda en la base. Permite realizar pruebas en múltiples tipos de materiales.

El registro y procesamiento de datos se llevan a cabo mediante la comunicación entre el Arduino y un programa en Python. Durante el ensayo, el Arduino envía los datos en tiempo real al software, que los grafica de manera simultánea y los almacena en archivos CSV para su análisis posterior. Una descripción detallada de este flujo de datos, así como del procesamiento estadístico aplicado, se presenta en la sección de tratamiento de datos.

Montaje de la muestra

En cuanto al montaje de la muestra, se emplearon dos tipos de sujeción: 1) Para muestras de estructura fibrosa, en forma de cinta o alambre, se utilizó un agarre en “O” (Figura 5), que sujeta firmemente ambos extremos para evitar deslizamiento. 2) Para probetas de termoplástico, se fabricaron especímenes con geometría de “hueso de perro” (Figura 6), que se ajustan entre mordazas diseñadas para reducir concentraciones de tensión y facilitar la alineación axial. Es importante mencionar que el proceso de montaje de la muestra puede introducir variabilidad adicional en la medición, debido a ligeras desviaciones en la alineación, ajuste o deslizamiento en el agarre. Este efecto también contribuye a la incertidumbre en el cálculo de las propiedades mecánicas. Si bien no se dispuso de un sistema certificado de calibración, la validación se realizó mediante comparación con valores reportados en literatura especializada. Los resultados mostraron consistencia notable con estudios previos, particularmente en las tendencias de comportamiento mecánico bajo diferentes tratamientos. Esta concordancia sugiere que, a pesar de la simplicidad del sistema, la confiabilidad de las mediciones comparativas es alta.

Preparación y montaje de las muestras

Las muestras se prepararon y montaron considerando las características y limitaciones del diseño propio de la máquina de ensayo. Para materiales como acero, cobre, cabello, mecate, nylon y teflón, se cortaron segmentos con longitudes promedio de 14 a 16 cm. Cada extremo del material se fijó entre arandelas metálicas apretadas para evitar deslizamiento durante el ensayo. Las arandelas se ensamblaron en anillos sujetos a los ganchos superior e inferior de la máquina. Para reducir concentraciones de tensión y mejorar la distribución de carga se insertó un conector metálico en forma de “U” (pieza comercial estándar) entre el gancho y el anillo, contribuyendo también a la alineación de la muestra (Figura 5).

Para el termoplástico se fabricaron probetas con forma de “hueso de perro” basándonos en la norma ASTM D6381, adaptadas al tamaño operativo del equipo (longitud aproximada de 6 cm) (Figura 6).

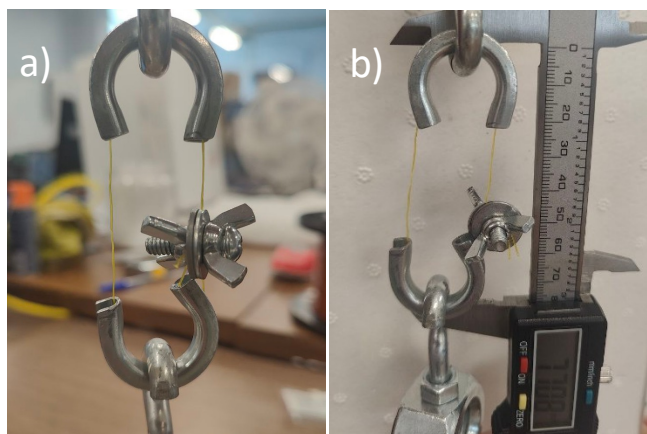


Figura 5. Sistema de sujeción tipo "O" para muestras fibrosas. Dispositivo utilizado para montar muestras delgadas o flexibles como hilos metálicos, nylon o teflón. Consiste en dos anillos metálicos cerrados que minimizan el deslizamiento y aseguran una distribución uniforme de la carga. a) Montaje de la muestra y b) Mecanismo utilizado para medir la longitud inicial de la muestra antes de iniciar la prueba.



Figura 6. Probetas de policaprolactona en forma de "Hueso de perro". Las probetas se diseñaron según la norma ASTM D638, adaptadas a las dimensiones operativas de la máquina. Su geometría permite una mejor alineación axial y reduce concentraciones de esfuerzo en la zona de sujeción.

La longitud inicial de la medición se determinó con un vernier. Para las probetas plásticas se midió antes del montaje; en el resto de los materiales, se ajustaba en la máquina eliminando holguras y aplicando una ligera tensión axial antes de iniciar la medición formal.

El área transversal se determinó antes del ensayo. Para muestras montadas con agarre tipo anillo (acero, cobre, cabello, mecate, nylon, teflón), se estimó el área efectiva como el doble del área de la sección transversal del filamento, dado el trayecto completo de la carga. La medición del diámetro se realizó con el vernier.

Para controlar el deslizamiento en las arandelas se marcaron los extremos del material en contacto, permitiendo verificar el movimiento durante la prueba, fenómeno que se presentó con cierta frecuencia. No se usaron mordazas ni recubrimientos adicionales para proteger los biomateriales, debido al diseño basado en ganchos y arandelas.

Variaciones de la prueba respecto a la norma

El diseño de la máquina y la diversidad de materiales probados exigieron diversas adaptaciones frente a las normas estándar. En particular, se emplearon probetas de dimensiones reducidas, con longitudes menores a las recomendadas en algunos casos. Para los materiales plásticos, se utilizó una geometría en “hueso de perro” adaptada al equipo, de aproximadamente 6 cm de longitud total. Estas probetas incluían una sección central más angosta con cortes laterales (Figura 6) (2.15 mm de separación y ancho definido por el filo del cúter) para inducir la ruptura en un punto específico y controlar el sitio de falla. Dado que la máquina universal no cuenta con control automatizado de velocidad programable, las velocidades de deformación se ajustaron manualmente, midiendo desplazamiento con un flexómetro en intervalos definidos para aproximar la tasa de carga. Además, las pruebas se realizaron en un ambiente no controlado, sujeto a variaciones de voltaje, temperatura y humedad. La sujeción de las muestras se realizó con arandelas y ganchos en lugar de mordazas normalizadas. En algunos casos se incluyeron conectores en forma de “U” para mejorar la distribución de la carga, aunque para muestras pequeñas o poco resistentes (como algunos cabellos) no se emplearon por limitaciones de tamaño.

Tratamientos realizados a los materiales

Para evaluar el efecto de distintos tratamientos térmicos y ambientales en las propiedades mecánicas de los materiales, se aplicaron las siguientes condiciones:

Metales (acero y cobre):

- Acero: tratamientos de recocido en mufla a 300 °C durante 24, 48 y 72 h (con las muestras de 24 h como control).
- Cobre: comparación entre muestras a temperatura ambiente (sin tratamiento) y cobre recocido a 300 °C durante 24 h.

Termoplástico:

- Probetas moldeadas después de una única fusión.
- Probetas preparadas con material refundido dos veces adicionales (tres fusiones en total) para evaluar la degradación mecánica por reprocesado.

Cabello:

- Sin tratamiento.

Mecate:

- Sin tratamiento.

Tratamiento de datos

Los datos de fuerza y elongación se registraron automáticamente durante cada ensayo, generando archivos CSV mediante un sistema de adquisición controlado con Python. Este procesamiento inicial incluía la conversión directa a esfuerzo y deformación ingenieriles, permitiendo obtener una curva preliminar al finalizar cada prueba. Posteriormente, los archivos se procesaron con mayor detalle para limpiar datos, comparar muestras y realizar análisis estadístico. Se generaron gráficas de esfuerzo-deformación para cada condición experimental, de las que se obtuvieron propiedades clave: Módulo de Young (zona elástica), esfuerzo de fluencia, esfuerzo máximo, esfuerzo de ruptura, resiliencia (área bajo la porción elástica) y tenacidad (área total bajo la curva hasta fractura). Para cada material se realizaron en promedio cinco pruebas por condición experimental. En el caso del acero, se efectuaron más repeticiones debido a dificultades para alcanzar la ruptura debido a la alta resistencia del material y a las limitaciones de la máquina de tensión.

Se realizó análisis estadístico que incluyó la normalización de datos para permitir comparaciones gráficas consistentes entre diferentes materiales y condiciones experimentales. Para cada condición experimental ($n > 5$ repeticiones), se calcularon la media y desviación estándar, proporcionando una base sólida para la evaluación de la variabilidad experimental.

El procesamiento automatizado en Python permitió: 1) Normalización de curvas esfuerzo-deformación para comparación visual directa, 2) Cálculo sistemático de propiedades mecánicas clave, 3) Determinación de la consistencia interna de los datos mediante análisis de varianza

Resultados y discusión

En este apartado se presentan los resultados de las pruebas de tracción realizadas para comparar el efecto de diferentes tratamientos térmicos y de inmersión en las propiedades mecánicas del acero y del cabello. Para cada condición se obtuvo el módulo de Young, el esfuerzo de fluencia, el esfuerzo máximo, el esfuerzo de ruptura, la resiliencia y la tenacidad.

Metales: acero y cobre

En la Figura 7 se muestran las curvas de esfuerzo-deformación para el acero galvanizado con un tratamiento térmico de 300°C a 24h (verde), 48h (rojo) y 72h (azul). Asimismo, en la tabla 1 se resumen las propiedades mecánicas obtenidas a partir de las gráficas mencionadas. El esfuerzo máximo y de ruptura no se ve afectado por el tratamiento a baja temperatura (300°C), sin embargo, el calentamiento a tiempos largos favorece un aumento en la ductilidad que se aprecia en el aumento en el área bajo la curva conforme aumenta el tiempo (Figura 7).

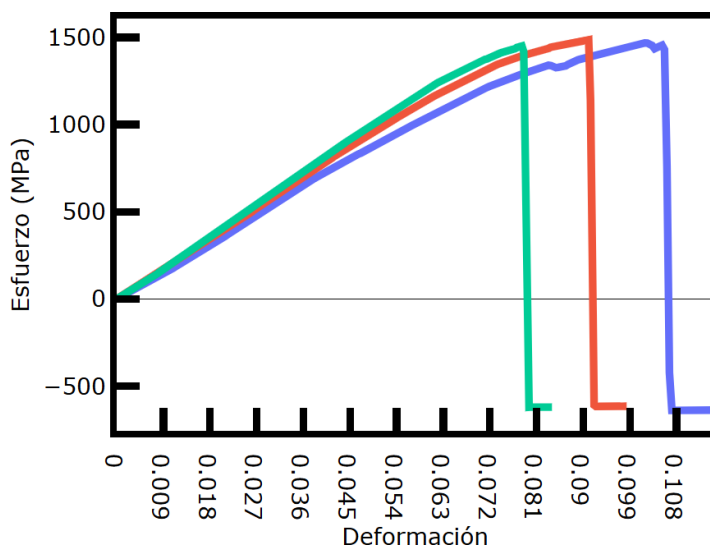


Figura 7. Comparación de las curvas esfuerzo-deformación del acero galvanizado obtenidas con diferentes tiempos de recocido térmico. Se observa el efecto de 24 h (verde), 48 h (rojo) y 72 h (Azul) a 300 °C. A mayor tiempo, aumenta la ductilidad (zona plástica más amplia), pero se reduce el esfuerzo.

Tabla 1. Propiedades del acero galvanizado después de diferentes tiempos de tratamiento térmico

Propiedad	24h (control)	48h	72h
Módulo (GPa)	19.37 ± 1.25	20.09 ± 1.43	19.27 ± 2.01
Esfuerzo máximo (MPa)	1553.21 ± 64.78	1522.76 ± 25.93	1231.93 ± 189.39
Esfuerzo ruptura (MPa)	778.71 ± 144.47	781.41 ± 223.64	742.56 ± 147.48
Tenacidad (MPa)	41.95 ± 16.54	78.04 ± 10.82	85.97 ± 2.97

Cobre

En la Figura 8, se muestra la curva esfuerzo-deformación del cobre donde se observa una clara región plástica con una deformación continua con un aumento moderado en la tensión, lo que refleja su capacidad para deformarse antes de fracturarse. La transición entre las fases elástica y plástica es suave, y la ruptura ocurre tras una elongación significativa. Este comportamiento indica la capacidad del cobre para absorber energía antes de romperse, deformándose plásticamente en lugar de fallar de forma frágil. En la tabla 2, se resumen

los resultados del tratamiento de recocido para el cobre a una temperatura de 300 °C, este tratamiento tuvo la finalidad de homogeneizar su estructura y aliviar tensiones internas.

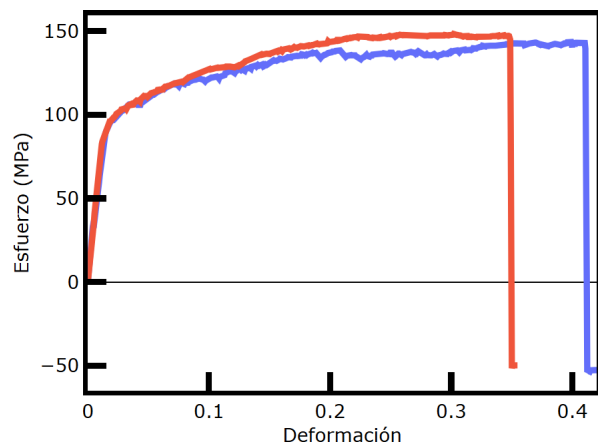


Figura 8. Curva esfuerzo-deformación obtenidas de las muestras de cobre sin y con tratamiento térmico. Se observan muestras típicas de metal dúctil, con transición clara entre la zona elástica y plástica. La deformación extensa antes de la fractura confirma la alta ductilidad del cobre a diferencia de lo observado en metales como el acero galvanizado.

Tabla 2. Propiedades del cobre después del tratamiento térmico (300 °C)

Propiedad	Control	24h
Módulo (GPa)	3.81 ± 3.72	4.84 ± 4.46
Esfuerzo máximo (MPa)	155.15 ± 9.57	237.85 ± 68.96
Esfuerzo ruptura (MPa)	80.91 ± 24.04	123.32 ± 34.29
Tenacidad (MPa)	54.63 ± 3.71	31.51 ± 15.28

Polímeros: teflón, policaprolactona (termoplástico), polipropileno (mecate)

Teflón

El Teflón exhibió un módulo de Young bajo (0.587 GPa), consistente con su naturaleza flexible y baja rigidez. La curva esfuerzo-deformación mostró una deformación plástica extensa antes de la ruptura, típica de polímeros semicristalinos con cadenas deslizantes. La curva esfuerzo-deformación del teflón se muestra en la Figura 9.

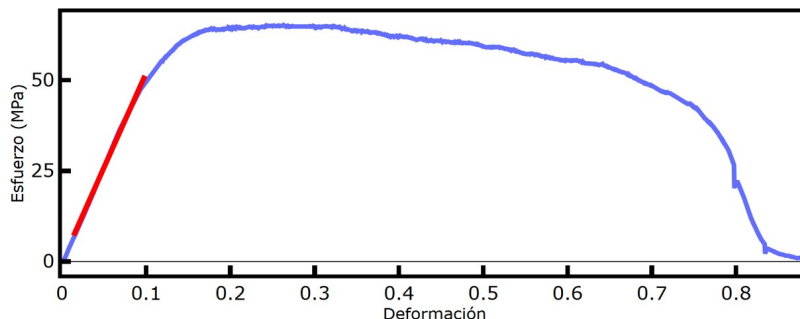


Figura 9. Curva esfuerzo-deformación del teflón con la región elástica resaltada (rojo). La curva presenta una pendiente inicial (módulo de Young reducido) y una transición amplia a deformación plástica, consistente con el comportamiento de polímeros semicristalinos como el teflón.

Termoplástico

En la Figura 10, se muestra la curva esfuerzo-deformación de la policaprolactona, donde se observa que, después de superar el límite elástico, el material muestra una marcada zona plástica, y además la deformación aumenta significativamente debido a la tensión, indicando una alta ductilidad. La transición hacia la fractura es gradual, con un esfuerzo de ruptura bajo en comparación con los materiales metálicos, lo que es típico en termoplásticos que pueden deformarse considerablemente antes de fallar. En la tabla 3 se resumen las propiedades obtenidas de la curva antes y después del tratamiento, las fundiciones consecutivas del termoplástico redujeron su tenacidad y módulo de Young, probablemente por la degradación térmica de las cadenas poliméricas, lo que disminuye la capacidad de absorción de energía.

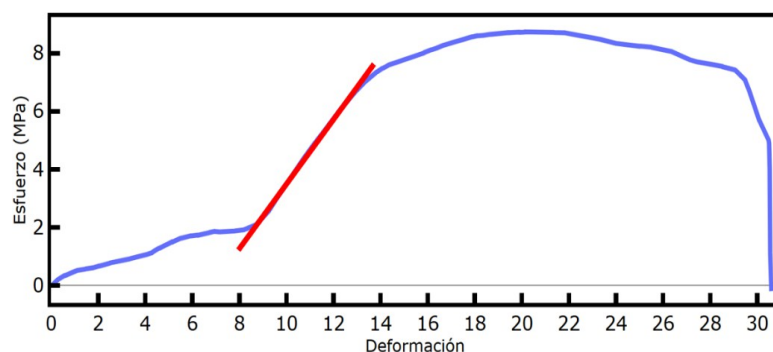


Figura 10. Curva esfuerzo-deformación obtenida del termoplástico. El material muestra un comportamiento típicamente frágil con baja rigidez. La refundición térmica altera la pendiente inicial, reflejando degradación estructural del polímero. La línea roja destaca la zona elástica

Tabla 3. Resultados de las propiedades mecánicas del termoplástico

Propiedad	Control	24hrs
Módulo (MPa)	1.001 ± 0.192	0.267 ± 1.308
Esfuerzo máximo (MPa)	8.258 ± 2.430	7.178 ± 2.229
Tenacidad (MPa)	193.41 ± 96.57	163.22 ± 84.78

Mecate

En la curva tensión-deformación del mecate en condición control, mostrada en la Figura 11, se observa inicialmente una pendiente lineal pronunciada, que corresponde al módulo de elasticidad y refleja la rigidez del material. Luego, al superar el límite elástico, el material entra en una zona plástica donde la deformación aumenta con un incremento más lento de la tensión.

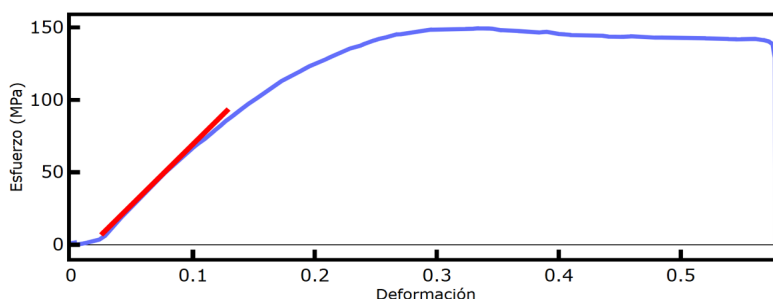


Figura 11. Curva esfuerzo-deformación del mecate con la parte lineal resaltada (línea roja). La curva representa el comportamiento mecánico sin exposición a radiación UV. Se observa una zona elástica definida seguida de una ruptura brusca, típica de un polímero con limitada deformación plástica. La línea resaltada indica el módulo de Young.

Biomateriales: Cabello

La curva esfuerzo-deformación para el cabello, mostrada en la Figura 12, presenta una zona de deformación plástica donde la tensión se mantiene casi constante o aumenta ligeramente mientras el cabello se estira más allá del límite elástico, lo que indica una capacidad para absorber energía mediante elongación permanente sin fracturarse inmediatamente. Finalmente, la curva culmina en una ruptura brusca, representando la fractura del filamento capilar.

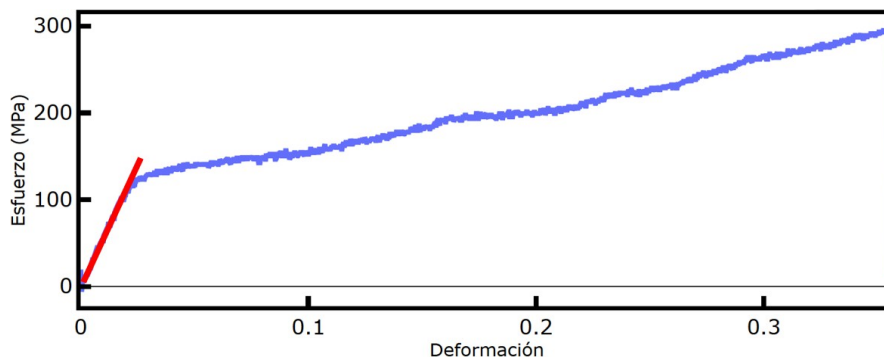


Figura 12. Curva esfuerzo-deformación obtenida del cabello humano sin tratamiento. La curva presenta una pendiente inicial moderada, seguida de una deformación plástica antes de la fractura. La zona lineal resaltada corresponde al cálculo del módulo de Young. Se aprecia una cantidad considerable de "ruido" en la curva, atribuida a la naturaleza del material y su pronta fractura.

Conclusiones

El presente estudio demostró la viabilidad de una máquina universal de tracción de bajo costo para la caracterización mecánica de materiales tradicionales y biomateriales. Los resultados obtenidos validan la capacidad del equipo para detectar cambios significativos en propiedades mecánicas inducidos por tratamientos térmicos y ambientales, con sensibilidad comparable a reportes de la literatura especializada. El sistema desarrollado representa una contribución importante al reducir las barreras económicas en la caracterización mecánica básica, siendo particularmente valioso para instituciones educativas con recursos limitados y proyectos de desarrollo preliminar de biomateriales.

Además, se identificaron comportamientos diferenciales claros entre categorías de materiales, donde los biomateriales mostraron alta sensibilidad a condiciones ambientales, mientras los materiales tradicionales respondieron consistentemente a tratamientos térmicos. Estas diferencias destacan la importancia de la caracterización específica para cada tipo de material, especialmente en aplicaciones biomédicas donde las condiciones de servicio son críticas.

Por otro lado, la falta de calibración certificada afecta la precisión de las mediciones, aunque no compromete la validez de las comparaciones relativas. Esta limitación representa una oportunidad para futuras mejoras en el sistema, incluyendo la implementación de protocolos de calibración certificada y el desarrollo de sistemas automatizados para medición de deformación.

El trabajo sienta las bases para la democratización de tecnologías de caracterización mecánica, abriendo perspectivas de investigación en el desarrollo de materiales sostenibles y la integración con técnicas complementarias de caracterización. La metodología validada contribuye significativamente a la formación de recursos humanos y al avance en el estudio de materiales accesibles para aplicaciones en ingeniería y biomedicina a nivel licenciatura.

Referencias

1. ASTM International. (2021). Standard test methods for tension testing of metallic materials (ASTM E8/E8M-21). https://www.astm.org/e0008_e0008m-21.html
2. ASTM International. (2022). Standard test method for tensile properties of plastics (ASTM D638-22). <https://www.astm.org/d0638-22.html>.
3. Callister, W. D., & Rethwisch, D. G. (2020). Fundamentos de ciencia e ingeniería de materiales (9.^a ed.). Reverté.
4. Davis, J. R. (2004). Tensile testing (2.^a ed.). ASM International.
5. Dowling, N. E. (2013). Comportamiento mecánico de materiales: Ingeniería de materiales y mecánica de sólidos (4.^a ed.). Pearson Educación.
6. Fraser, R. D. B., & Parry, D. A. D. (2011). The structural basis of the filament-matrix texture in the avian/reptilian group of hard β -keratins. *Journal of Structural Biology*, 173(2), 391–405. <https://doi.org/10.1016/j.jsb.2010.10.001>.
7. ISO. (2019). Metallic materials — Tensile testing — Part 1: Method of test at room temperature (ISO 6892-1:2019). International Organization for Standardization.
8. Lee, K. Y., & Mooney, D. J. (2012). Alginate: Properties and biomedical applications. *Progress in Polymer Science*, 37(1), 106–126. <https://doi.org/10.1016/j.progpolymsci.2011.06.003>.
9. Woods M.C., et al. *Open-Source Flexible Material Tensile Testing Apparatus*. MDPI — (2024)
10. Salih A., et al. *A Low-Cost Open-Source Uniaxial Tensile System for Soft Tissue Testing*. MDPI — (2024).

