

Generación de modelos numéricos de resortes de extensión basados en imágenes

Generation of Numerical Models of Extension Springs Based on Images

Marco Ciaccia-Sortino ^{1a}, David Ojeda-Peña ^{1b}

¹ Grupo de Investigación en Sistemas Industriales y Biomecánica (SIBI), Facultad de Ingeniería en Ciencias Aplicadas, Universidad Técnica del Norte, Ecuador. Orcid: [0000-0001-8293-8040](https://orcid.org/0000-0001-8293-8040) ^a, [0000-0002-1869-4819](https://orcid.org/0000-0002-1869-4819) ^b.
Correos electrónicos: mciaccia@utn.edu.ec ^a, daojeda@utn.edu.ec ^b.

Recibido: 7 octubre, 2024. Aceptado: 12 diciembre, 2025. Versión final: 20 febrero, 2025.

Resumen

Los resortes fabricados artesanalmente en Ecuador presentan desviaciones geométricas respecto a los supuestos de diseño, afectando su desempeño y confiabilidad. Como alternativa a la realización de ensayos con máquinas especializadas para determinar su comportamiento mecánico, se sugiere emplear un procedimiento basado en visión por computadora y modelamiento numérico del resorte. En este trabajo se presenta un avance en este sentido mediante una metodología para construir un modelo numérico de la geometría real del resorte empleando fotografías y algoritmos de procesamiento de imágenes. Se crea un ambiente fotográfico que facilita la toma de imágenes en direcciones ortogonales, y se procesan las imágenes usando la librería OpenCV en Python para determinar puntos que describen la trayectoria del alambre del resorte. Estos puntos se convierten en una malla de elementos finitos para simular el comportamiento mecánico del resorte. Para validar la metodología, se realiza una comprobación de la conformidad geométrica del modelo con el resorte, y se comparan las curvas fuerza-desplazamiento real y simulada. Los resultados muestran que se logra una buena conformidad geométrica, y una excelente correspondencia entre la constante de rigidez obtenida experimentalmente y la simulada.

Palabras clave: mecánica; resortes de extensión; procesamiento de imágenes; geometría computacional; simulación; método del elemento finito.

Abstract

Non-standard springs manufactured in Ecuador show geometric deviations from design assumptions, affecting their performance and reliability. As an alternative to testing with specialized machines to assess their mechanical behavior, a procedure based on computer vision and numerical modeling of the spring is suggested. This work presents a step forward in this direction through a methodology to construct a numerical model of the real geometry of the spring using photographs and image processing algorithms. A photographic setup is created that makes it easier to take images in orthogonal directions, and the images are processed using the OpenCV library in Python to define points that describe the path of the spring wire. These points are converted into a finite element mesh to simulate the mechanical behavior of the spring. To validate the methodology, a geometric compliance check of the model with the spring is performed, and the actual and simulated force-displacement curves are compared. The results show good geometric compliance and an excellent match between the experimentally obtained and simulated stiffness constants.

Keywords: calibration; extreme flows; hydrological basins; probability distribution functions; torrentiality index; spatial interpolation; modified rational method; precipitation; Andean region.

1. Introducción

La visión artificial, o visión por computadora, es un proceso mediante el cual se miden o se estiman las propiedades físicas y/o cinemáticas de objetos de interés empleando algoritmos computacionales que procesan imágenes tomadas a los objetos estudiados [1]. El campo de aplicación de la visión artificial es sumamente amplio; sin embargo, en esta investigación son de particular interés los algoritmos que miden forma, tamaño y posición de los cuerpos, tales como los empleados por Perani *et al.* [2], quienes estimaron el tamaño de la línea de deposición de material fundido en una impresora 3D de metal a partir de la geometría de la piscina del material fundido; Li *et al.* [3], que usan métodos de detección y optimización de líneas y círculos en imágenes tomadas con una sola cámara para calcular la falta de coaxialidad entre el pistón y el cilindro de un actuador de frenos, y por Martini *et al.* [4] y Sun *et al.* [5], quienes midieron los desplazamientos de estructuras a partir de imágenes estereoscópicas y monoculares, respectivamente.

La mayoría de los algoritmos modernos de visión artificial se basan en algún tipo de inteligencia artificial o *deep learning* [6], pero aún existe espacio para innovar utilizando algoritmos clásicos, como demuestran McGuinness *et al.* [7], quienes usan técnicas de segmentación, erosión y dilación para medir y clasificar semillas de pino, y Xi *et al.* [8] y Saif *et al.* [9], que desarrollaron sistemas para la medición del tamaño y redondez, respectivamente, de agujeros maquinados, usando detección de círculos a partir de imágenes tomadas con una cámara. Otra técnica empleada frecuentemente es la de concordancia de patrones, o *template matching*, en la cual se utiliza un enfoque híbrido entre la información tomada de las imágenes y un patrón para estimar el comportamiento físico del objeto, como se muestra en [6], [10].

En el campo de la Mecánica también es posible incluir algunas de las técnicas descritas en el diseño y predicción del comportamiento de elementos de máquina. El diseño de cualquier elemento mecánico produce como resultado un componente ideal que en general presenta, una vez construido, diferencias con el diseñado debido a varias causas, como el factor humano, las limitaciones del proceso de manufactura y la variabilidad de las características del material [11], [12]. Si el proceso de fabricación sigue estándares y métodos establecidos en la industria, las diferencias entre el producto manufacturado y el diseñado serán tan pequeñas que se puede asumir que los comportamientos esperado y real serán similares. En el caso contrario, el comportamiento real del componente puede resultar en pérdidas del rendimiento y confiabilidad de los sistemas de los que es parte, así como

un incremento en los costos operativos y reducción de la seguridad de operación del sistema.

En el caso específico de los resortes helicoidales de extensión, que es un elemento que se encuentra bien documentado en los libros de diseño mecánico [13], [14] y en los manuales de proveedores [15], su caracterización mecánica se rige por normas como la ISO-DIS-22705-1 [16] y la ISO-DIS-22705-2 [17], entre otras, mediante las cuales se estiman la rigidez del resorte y su precarga como características principales.

Los resortes de extensión se emplean cuando se requiere aplicar una fuerza de tracción sobre un sistema mecánico, y están constituidos por un alambre enrollado en espiral que termina en ganchos en ambos extremos del resorte. En general, cuando se requiere la sustitución de un resorte de una máquina comercial y no se encuentra disponible comercialmente su reemplazo, o cuando se desarrolla un diseño original que requiere un resorte con características específicas, se tiene que recurrir a la manufactura del resorte bajo pedido a fabricantes locales. En el caso específico de Ecuador, los operadores de máquinas para fabricación de resortes no se encuentren debidamente capacitados y es frecuente que las máquinas utilizadas sean de fabricación artesanal [18]. Adicionalmente, no se conocen las especificaciones del material disponible, y solo admiten variables geométricas básicas para elaborar el resorte. Todos estos factores influyen negativamente en el resultado final del resorte fabricado.

En Almeida *et al.* [19] se realizaron ensayos mecánicos de resortes fabricados en distintos talleres de varias ciudades de Ecuador y se detectaron comportamientos significativamente diferentes entre las curvas experimentales y las curvas teóricas esperadas según el diseño. La comparación de la geometría entre resortes diseñados o ideales, comerciales, y fabricados localmente permite identificar diferencias importantes.

En la Figura 1 se muestran imágenes de un modelo CAD de la geometría ideal y fotografías de un resorte fabricado artesanalmente en un taller de Ecuador; adicionalmente, se superpuso una línea que coincide con los puntos extremos de los ganchos. El resorte fabricado localmente se encargó con las especificaciones del modelo CAD. Algunas de las diferencias entre ambos elementos son la forma, orientación y localización de los ganchos respecto al cuerpo, y la falta de rectitud del cuerpo del resorte manufacturado.

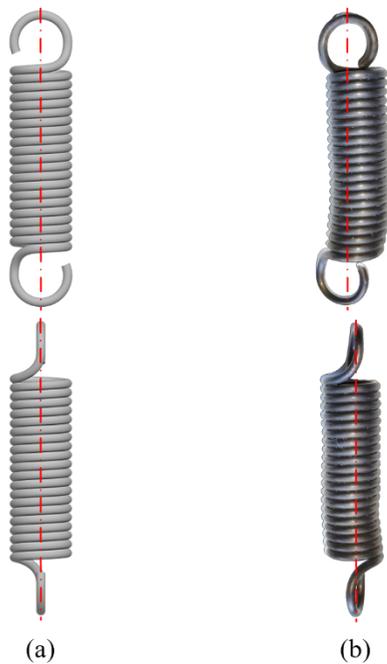


Figura 1. Resortes helicoidales de extensión: (a) geometría ideal (esperada), (b) resorte fabricado localmente. Fuente: elaboración propia.

De particular interés es la alineación de los ápices de los ganchos, donde se aplica la fuerza de extensión, con el eje axial del cuerpo del resorte. Si esa alineación existe, el cuerpo del resorte estará sujeto solamente a tracción y las espiras tendrán una distribución uniforme del esfuerzo cortante; en caso contrario, como se evidencia en el resorte artesanal, actuará adicionalmente un momento de flexión que variará la distribución del esfuerzo cortante en las espiras, y modificará la respuesta esperada del resorte.

Una alternativa para obtener el comportamiento real del resorte es disponer de una máquina de ensayos universal. La implementación de esta solución es improbable en el medio ecuatoriano por la escasez de estos dispositivos y el alto costo de cada prueba. Otra alternativa es crear un modelo numérico que simule la respuesta del resorte real. Para que esta alternativa pueda ser viable en un entorno industrial, debería crearse una solución automatizada que requiera una intervención humana mínima. Esto es posible integrando visión por computadora y modelamiento numérico del resorte, y tiene el potencial de ser una solución mucho más económica que un ensayo de tracción. En este trabajo se presenta un avance en este sentido, desarrollando una metodología para construir un modelo numérico de un resorte construido artesanalmente, con énfasis en la aplicación de algoritmos de procesamiento de imágenes. El objetivo es la obtención de una geometría lo más cercana posible a

la del resorte real, y simular su comportamiento mecánico utilizando el método del elemento finito. Finalmente, se comparan los resultados numéricos con los experimentales para determinar la validez de la metodología.

2. Materiales y métodos

Para el desarrollo y aplicación de la metodología se empleó el resorte mostrado en la Figura 1, fabricado en un taller localizado en Ecuador y utilizado inicialmente en la investigación descrita en [19]. Las especificaciones suministradas al taller y los valores medidos en el resorte, ya fabricado, se muestran en la Tabla 1.

Tabla 1. Características geométricas del resorte

Característica	Especificación de fabricación	Valor medido en el resorte
Diámetro del alambre (d) (mm)	2	2
Diámetro medio (D) (mm)	12	11,35 (calculado)
Diámetro externo ($D + d$) (mm)	14	13,35
Nro. de espiras	20	20,5
Extremos	Ganchos de espira doblada	Ganchos de espira doblada
Índice de resorte (D/d)	6	5,675

Fuente: elaboración propia.

El diámetro externo se midió con un vernier marca Mitutoyo en ocho ubicaciones diferentes, resultando en el promedio mostrado en la Tabla 1, con un rango de $\pm 0,1$ mm. El diámetro del alambre también se comprobó con el vernier, sin variaciones en ningún punto.

2.1. Datos experimentales

En [19], cada resorte fue estirado alrededor de 10 mm para conocer su comportamiento. En la Figura 2 se muestra la curva fuerza-desplazamiento experimental. Se puede apreciar un comportamiento no lineal al principio de la curva causado por una precarga residual del proceso de manufactura, ya que este factor no es parte de las especificaciones requeridas por el taller. Alrededor de los 2,8 mm de desplazamiento ocurrió un acomodo de los ganchos en la mordaza para resortes de la máquina de ensayos, causando una caída de la fuerza. El ajuste de una recta a los datos a partir de los 4 mm de desplazamiento permite estimar que la constante de rigidez es de 4,66 N/mm y la precarga es de 2,01 N.

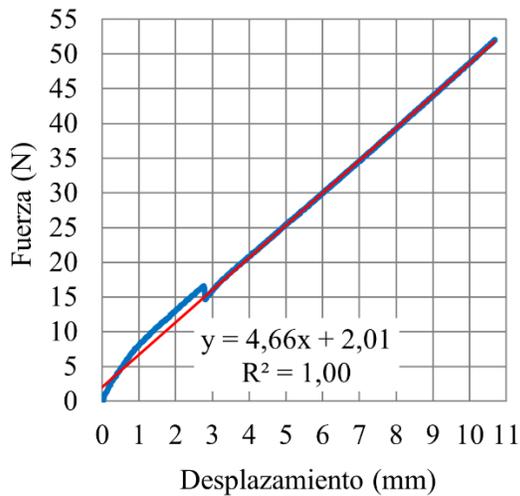


Figura 2. Curva fuerza-desplazamiento del resorte, con datos de Almeida *et al.* [19].

2.2. Adquisición de las imágenes

La adquisición de las imágenes se realizó con la cámara principal de un teléfono móvil Realme 6 pro, con sistema operativo Android™. Esta cámara tiene un zoom fijo 1x, y el sensor dispone de píxeles cuadrados [20]. Esta información es pertinente para la estimación del tamaño de las características del resorte.

Para seguir la trayectoria de las espiras se requiere tomar fotografías del perfil del resorte, como las mostradas en la Figura 1. Se determinó que cuatro imágenes, tomadas a un ángulo de 90° entre sí, constituyen un número óptimo debido a la complementariedad de la información que suministra cada una. En la Figura 3 se muestra un esquema de la toma de las imágenes, con la información que se obtiene por cuadrante. Por ejemplo, con una imagen en dirección -x se adquieren coordenadas $\pm y$ de los cuadrantes ① y ④, mientras que en dirección -y se obtienen coordenadas $\pm x$ de los cuadrantes ① y ②. Combinando esas dos imágenes se tienen las coordenadas (x, y) del cuadrante ①. Las coordenadas z tienen la dirección del eje del cuerpo del resorte, perpendicular al plano de la imagen.

Para facilitar la toma de las imágenes se diseñó, simuló y construyó un ambiente de fotografía con soportes para el teléfono, de forma que se puedan adquirir imágenes en direcciones perpendiculares entre sí orientadas hacia la línea central del cuerpo del resorte, sin necesidad de moverlo. La simulación fue necesaria para tomar en cuenta la deflexión del soporte al estar sujeto al peso del teléfono, ya que se construyó con glicol tereftalato de polietileno (PETG) mediante manufactura aditiva.

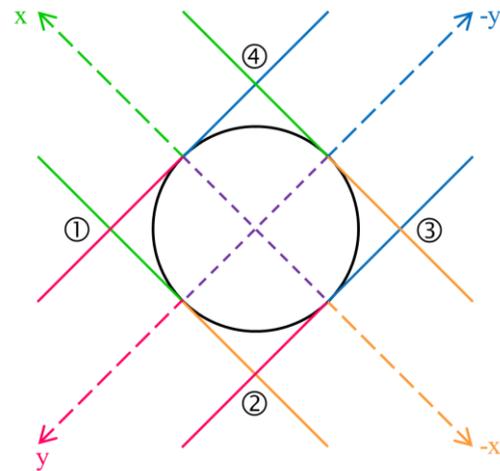


Figura 3. Direcciones y cuadrantes para la toma de imágenes. El círculo negro representa una espira del resorte. Fuente: elaboración propia.

En la Figura 4 se muestran el modelo geométrico y el ambiente de fotografía construido, con el teléfono instalado en uno de los soportes y lámparas de luz led. La orientación de ambos soportes garantiza la toma de imágenes en direcciones perpendiculares entre sí. La base dispone de puntos de referencia para centrar la cámara y para realizar corrección de perspectiva. La distancia desde el lente hasta la línea central del cuerpo del resorte es de 280 mm.

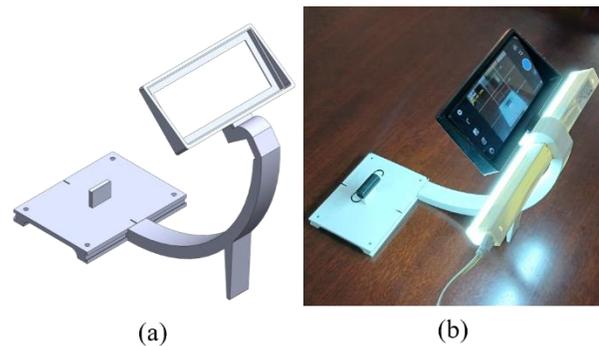


Figura 4. Ambiente de fotografía: (a) modelos geométricos de la base para el resorte y el soporte para el teléfono, (b) elementos fabricados y ensamblados, incluyendo lámparas led y el teléfono. Fuente: elaboración propia.

Para adquirir las imágenes se utilizó la aplicación Open Camera porque facilita el control preciso de la cámara, y provee ayudas en pantalla como un nivel horizontal y un indicador del ángulo de inclinación de la cámara. Las imágenes se tomaron con una resolución de 4608 x 3456 píxeles, aproximadamente 15,93 MP. La proporción de

las fotografías es igual a la del sensor, 4:3, para evitar la introducción de distorsiones por composición de los píxeles de la imagen. Para tomar las imágenes se orientó el resorte de forma que uno de sus ganchos quedara horizontal, posición garantizada con un nivel de burbuja pequeño ubicado sobre el gancho. Luego de tomadas las dos primeras imágenes, se hizo girar el resorte 180° sobre su eje axial hasta que el gancho quedara nuevamente en posición horizontal, y se tomaron las dos siguientes fotografías.

2.3. Procesamiento de las imágenes

Para obtener las coordenadas de los puntos de interés del resorte es necesario que las imágenes tengan un origen común en el sistema de referencia. Por esta razón, debido al cambio del punto de vista de la cámara al moverse de un soporte al otro, y tomando como referencia la primera fotografía, es necesario que se volteen las imágenes, es decir, se creen imágenes espejos según se muestra en [Tabla 2](#).

Tabla 2. Direcciones de espejo de las imágenes

Imagen	Dirección del espejo
1	Ninguna (referencia)
2	Horizontal (alrededor de un eje vertical)
3	Vertical (alrededor de un eje horizontal)
4	Ambas, horizontal y vertical

Fuente: elaboración propia.

Uno de los algoritmos probados, pero posteriormente descartado, requirió que se pintaran puntos blancos sobre el resorte. Estos puntos se confundían con el fondo blanco de la base, causando dificultades en la aplicación de otros algoritmos, por lo que la base fue pintada digitalmente en color verde. Se tomó como punto de referencia común el ápice de uno de los ganchos, y a partir de ese punto se definió una región de píxeles que engloba al resorte en las cuatro imágenes. El preprocesamiento completo se realizó con programas desarrollados con la librería OpenCV [21] en JupyterLab bajo el entorno Anaconda, en los siguientes pasos:

1. Determinación de la matriz de calibración de la cámara.
2. Corrección de la distorsión del lente.
3. Corrección de la perspectiva.
4. Creación de las imágenes espejo, según la [Tabla 2](#).
5. Desenfoque de las imágenes para reducir el ruido.
6. Cambio del espacio de color de BRG a HSV para excluir el color verde del fondo y crear una máscara negra del resorte.

7. Operaciones morfológicas para borrar el ruido restante.
8. Determinación de la longitud máxima de las máscaras.
9. Escalamiento de imágenes y máscaras, si fuese necesario.
10. Determinación del punto de referencia común.
11. Cálculo de la región rectangular común que engloba a las cuatro máscaras.
12. Recorte de las imágenes según la región calculada.

Para determinar la trayectoria de las espiras a partir de las imágenes recortadas se desarrolló, en la misma plataforma de software, un programa interactivo que facilita la ubicación de puntos sobre las espiras, comenzando en el ápice de uno de los ganchos y terminando en el ápice del otro. Este es un proceso que requiere intervención de un usuario, y su habilidad puede afectar la exactitud del resultado. La salida de este programa es un archivo con coordenadas (x, z) o (y, z), dependiendo de la imagen procesada, en unidades de píxeles. La resolución, en píxeles por milímetro, se calcula con la longitud de la máscara y la longitud medida del resorte. De esta manera, se convierten las coordenadas en píxeles a coordenadas en milímetros. Las coordenadas así obtenidas se dividen en dos grupos: las de los ganchos, que al estar compuestos por un alambre visible desde cualquier ángulo se pueden usar directamente, y las de las espiras del cuerpo del resorte, que son parcialmente visibles en cada imagen. Estas coordenadas conforman el *bounding box* o caja delimitadora del cuerpo del resorte, y se usan para determinar el centro y el radio de cada espira bajo la suposición de que sigue una trayectoria espiral circular.

Los datos conseguidos de las cuatro imágenes se combinaron tomando a z como variable independiente. Las coordenadas (x, y) de cada punto perteneciente a una espira se calcularon como parte de un círculo en incrementos de ángulos de $\pi/8$ radianes obteniéndose 16 puntos por espira. Finalmente, se obtuvo un archivo con coordenadas (x, y, z) de puntos que describen la trayectoria completa del alambre que conforma el resorte.

2.4. Validación de la metodología

Para determinar si la trayectoria obtenida describe acertadamente al resorte, se analizaron dos aspectos: la conformidad geométrica del cuerpo del resorte y el comportamiento mecánico del elemento completo.

2.4.1. Conformidad geométrica

Dos de las características medidas en el resorte, definidas en la [Tabla 1](#), son el diámetro del alambre *d* y el diámetro

medio del cuerpo D . Las espiras están unidas entre sí a lo largo de todo el cuerpo, por lo que la distancia entre centros del alambre en dos espiras consecutivas debe ser igual al diámetro d , como se ilustra en la [Figura 5](#).

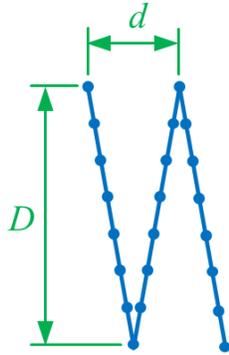


Figura 5. Esquema de parámetros geométricos del cuerpo del resorte para el análisis de conformidad geométrica. Fuente: elaboración propia.

Se calcularon las distancias entre puntos pertenecientes a espiras consecutivas y las distancias en el plano (x , y) entre puntos opuestos dentro de la misma espira para compararlas con d y D , respectivamente.

2.4.2. Simulación del comportamiento mecánico

Los puntos de la trayectoria del resorte se asumieron directamente como los nodos de una malla de elementos tipo viga. Los elementos, rectos, se definieron entre cada par de nodos consecutivos. El modelo se construyó para ser simulado mediante *Ansys Parametric Design Language* (APDL) [22]. Se escribió un programa en un cuaderno de JupyterLab que lee las coordenadas (x , y , z) y genera dos archivos de texto plano, uno con las coordenadas de los nodos en el formato esperado por Ansys para ser leído mediante el comando NREAD, y otro con las características de elementos tipo viga en el formato requerido por el comando EREAD [23]. El elemento seleccionado es el BEAM188 en su versión lineal [24], que tiene las siguientes capacidades de interés: influencia de las deformaciones cortantes en el comportamiento del elemento, seis grados de libertad por nodo, compatibilidad con no linealidad geométrica (grandes rotaciones), y rigidización por esfuerzos.

En otro archivo se creó el programa en el lenguaje APDL con la simulación completa. Se definieron el tipo de elemento, la sección transversal redonda maciza de 2 mm de diámetro, las propiedades elásticas del material, $E = 196,5 \cdot 10^3$ MPa, $G = 81,0 \cdot 10^3$ MPa, con la relación de Poisson derivada de esos parámetros. Las propiedades son genéricas de aceros para resorte tomadas de Budynas *et al.* [13], ya que no se conoce con exactitud de qué

material está compuesto el alambre. A continuación, se leyeron los nodos y la conectividad de los elementos, y se aplicaron las condiciones de contorno para impedir los movimientos de cuerpo rígido del resorte, definidos de la siguiente manera: en el primer nodo, que corresponde al ápice del primer gancho, se fijaron en cero las traslaciones en los tres ejes y la rotación alrededor del eje z . En el último nodo, que corresponde al ápice del segundo gancho, se fijaron en cero las traslaciones en x , y . Como carga se impusieron desplazamientos en z compatibles con los observados en la [Figura 2](#), en un principio con incrementos de 0,1 mm con la expectativa de capturar un comportamiento no lineal inicial debido a la irregularidad de la geometría del resorte, y posteriormente más espaciados, hasta llegar a los 10 mm. Finalmente, se guardaron en un archivo las reacciones de fuerza en el primer nodo, una por cada desplazamiento impuesto, para poder construir la curva fuerza-desplazamiento simulado.

3. Resultados

3.1. Imágenes

En la [Figura 6](#) se presentan las cuatro fotografías en dos etapas del procesamiento descrito en la sección 2.3. En la columna (a) se muestran los resultados posteriores al paso 3, y luego del paso 12 se obtienen las imágenes de la columna (b), que son las que se usan para extraer la trayectoria del alambre. De las imágenes de las filas 1 y 3 se obtuvieron coordenadas x (vertical) y z (horizontal), en las regiones de coordenadas $+y$ y $-y$, respectivamente; en estas imágenes la caja delimitadora se encuentra centrada verticalmente en ápice del gancho a la izquierda. De las filas 2 y 4 se adquirieron las coordenadas (y , z) en las regiones de coordenadas $-x$ y $+x$, respectivamente, con la caja delimitadora centrada en el gancho a la derecha. Obsérvese que las imágenes de la columna (b) se encuentran giradas con respecto a las de la columna (a), según se describe en la [Tabla 2](#). La caja delimitadora mide 871 x 284 píxeles y el resorte mide 68,2 mm de longitud, con lo que se tiene una resolución horizontal de 0,0783 mm/píxel. Se asume que la resolución vertical tiene el mismo valor debido a que los píxeles son cuadrados.

La [Figura 7](#) muestra los puntos superpuestos sobre una parte de las imágenes para que se puedan apreciar mejor.

Cada espira es descrita con ocho puntos en cada vista. Esto se logra mediante el programa desarrollado para tal fin; el usuario señala cuatro puntos sobre la espira y el programa muestra una curva polinómica de tercer grado sobre la imagen. El usuario indica si la curva describe satisfactoriamente a la espira y el programa procede a

generar los ocho puntos equiespaciados. Se obtuvo un total de 361 puntos, mostrados en la **Figura 8** unidos mediante rectas. También se presenta la línea que une los centros de las espiras del cuerpo del resorte.

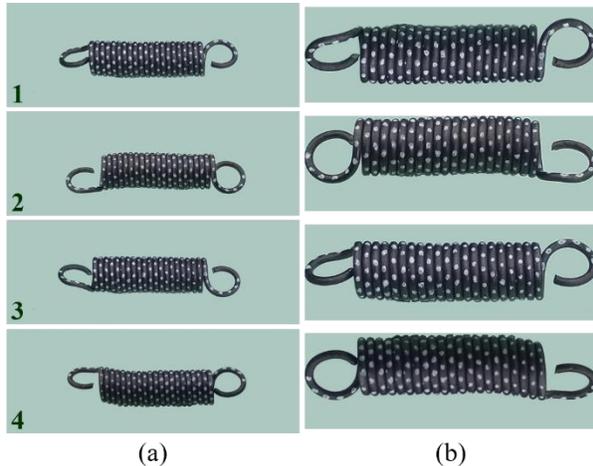


Figura 6. Fotografías procesadas, (a) imágenes corregidas por distorsión y perspectiva, (b) resultados finales del preprocesamiento. Fuente: elaboración propia.



Figura 7. Puntos superpuestos sobre las imágenes del resorte. Fuente: elaboración propia.

La representación de la línea central visibiliza la falta de rectitud del cuerpo, que debería afectar la distribución de los esfuerzos cortantes. También es visible la falta de alineación de los ápices de los ganchos entre sí y con la línea central del cuerpo. Por esta razón, al cargar el resorte la línea de acción de la fuerza formará un ángulo con la dirección general de la línea central.

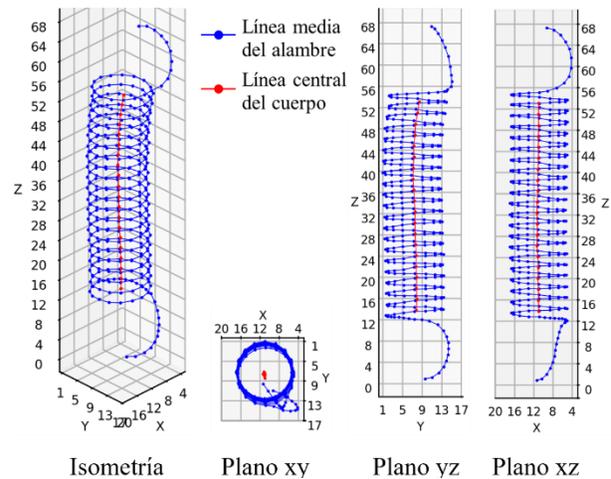


Figura 8. Vistas de la geometría y de la línea central del cuerpo del resorte. Fuente: elaboración propia.

3.2. Geometría

En la **Tabla 3** se muestran estadísticos descriptivos básicos y los valores extraídos del resorte para la verificación de la conformidad geométrica.

Tabla 3. Parámetros d y D de los puntos que conforman el cuerpo del resorte

Parámetro	Desviación estándar	Promedio	Referencia
d (mm)	0,08002	2,06	2,0
D (mm)	0,1220	11,63	11,35

Fuente: elaboración propia.

El promedio de la distancia entre espiras es cercano a la dimensión real del alambre del resorte con una diferencia del 3%, y la dispersión es baja considerando la desviación estándar. Por otro lado, el diámetro medio es mayor que el diámetro de referencia en un 2,5%, lo que puede considerarse aceptable, pero puede tener como consecuencia una constante de rigidez del modelo menor que la real. La dispersión también es mayor que la de la distancia entre espiras. Ambos resultados sugieren que el aspecto de la metodología en el que se determinan las coordenadas (x, y) de los puntos debe revisarse para mejorar la exactitud y disminuir la dispersión.

3.3. Comportamiento mecánico

Los puntos usados para reconstruir la geometría del alambre se usaron directamente como nodos, por lo que se tienen 360 elementos. La longitud total aproximada del alambre del resorte es de 795 mm. Las estadísticas de la longitud de los elementos son: mínima 1,14 mm,

máxima 2,49 mm, y media 2,21 mm. Con estos valores se considera que la malla es suficientemente refinada para la simulación. La línea verde en la **Figura 9** representa la curva simulada fuerza-desplazamiento, sobre la cual se dibujó una recta de ajuste ($R^2 = 1,00$) para determinar la constante de rigidez. Se incluyeron la curva experimental y la recta de ajuste de la **Figura 2** para facilitar la comparación.

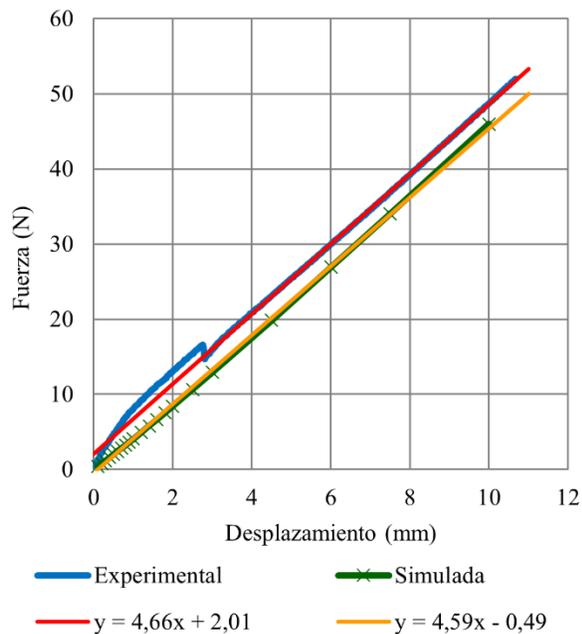


Figura 9. Curvas fuerza-desplazamiento del resorte, experimental y simulada. Fuente: elaboración propia.

La línea simulada no muestra la curvatura inicial característica de los resortes de extensión debido a que la precarga no fue implementada en el modelo de elementos finitos. Se puede apreciar que las rectas son casi paralelas como consecuencia de que las constantes de rigidez son similares, siendo la simulada un 1,5% menor que la experimental. Esta discrepancia es de esperar debido a la diferencia encontrada en los diámetros medio D . Las fuerzas experimental y simulada, para un desplazamiento impuesto de 10 mm, son de 48,7 N y 45,9 N respectivamente, una diferencia de 2,8 N explicada por la precarga inicial y la diferencia en las constantes de rigidez.

Una de las consecuencias de la falta de alineación entre la línea de acción de la fuerza y el cuerpo del resorte puede apreciarse en la **Figura 10**.

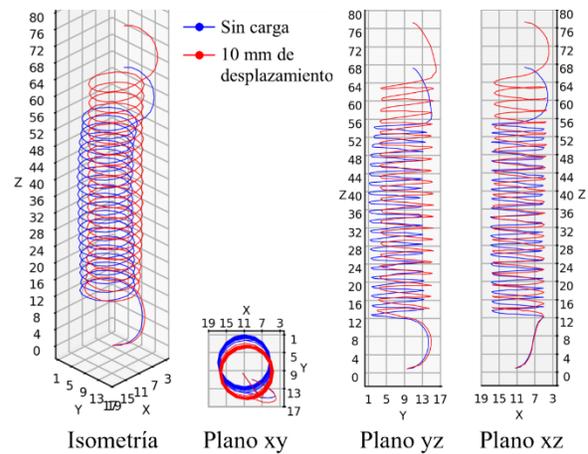


Figura 10. Vistas del modelo del resorte, sin carga y con un desplazamiento de 10 mm del extremo superior.

Fuente: elaboración propia.

El desplazamiento del extremo superior en dirección z causó que el cuerpo se traslade para alinearse con la recta de acción de la fuerza actuante. Este efecto puede apreciarse en casi todas las vistas de la **Figura 10**. Adicionalmente, en el plano yz puede verse que las espiras de la zona superior del resorte experimentaron una rotación en el plano como consecuencia del momento de flexión requerido para la alineación del cuerpo del resorte. Este efecto puede causar una distribución desigual del esfuerzo cortante a lo largo del alambre del resorte. Para confirmarlo, se requiere modelar el alambre como un sólido con malla 3D que capture la variación del esfuerzo entre la parte interna y la externa de las espiras, y a lo largo de todo el resorte.

4. Conclusiones

El uso de imágenes para la construcción del modelo numérico de un resorte con apoyo de algoritmos computacionales es una técnica viable y, aún en las primeras etapas del desarrollo de esta metodología, se ha obtenido una representación con buena conformidad geométrica y un comportamiento mecánico que, si bien aún no predice con exactitud la fuerza necesaria para causar un desplazamiento dado, si expresa correctamente la rigidez del resorte. La metodología presentada es un paso relevante en la creación de una solución automatizada para la determinación del comportamiento mecánico de un resorte, alternativa a la realización de un ensayo mecánico, especialmente si el resorte no cumple con las características geométricas supuestas en el diseño, como la forma de los ganchos, uniformidad de las espiras, y rectitud del cuerpo, entre otras.

Los resultados destacan la necesidad de refinar la metodología para mejorar la precisión y reducir la dispersión de las coordenadas de los puntos en el plano transversal al eje del resorte. En este sentido, se requiere implementar algoritmos más avanzados de visión por computadora para eliminar la intervención de un operador humano en la determinación de la trayectoria del alambre, lo que aumentaría la velocidad de generación del modelo, además de reducir los errores geométricos. También se puede mejorar la precisión incluyendo líneas paralelas dibujadas sobre el plano de fondo del resorte, con la finalidad de mejorar la corrección de la distorsión por proyección de las coordenadas, tal como se realizó en el trabajo de Miao *et al.* [25]. La inclusión de la pretensión en la simulación numérica habilitaría la determinación precisa de la relación fuerza-desplazamiento. Finalmente, la simulación de un modelo con elementos 3D, en lugar de elementos 1D, permitiría estudiar los efectos de las irregularidades geométricas en la distribución de los esfuerzos en el alambre.

Agradecimientos

Los autores queremos expresar nuestro agradecimiento al Ing. Jonathan Xavier Lima Trujillo, del laboratorio de Manufactura e Ingeniería Inversa de la Universidad Técnica del Norte, por sus recomendaciones y apoyo en el diseño y construcción del ambiente de fotografía para los resortes.

Financiación

No aplica.

Contribución de los autores

M. Ciaccia-Sortino: Conceptualización, Investigación, Metodología, Administración del proyecto, Recursos, Software, Visualización, Manuscrito inicial. D. Ojeda-Peña: Investigación, Metodología, Supervisión, Validación, Revisión y edición del manuscrito.

Todos los autores han leído y están de acuerdo con la versión publicada del artículo.

Conflicto de interés

Los autores declaran que no tiene ningún conflicto de interés con relación al desarrollo de la investigación, ya sea de carácter personal, económico, de autoría o cualquier otro tipo, que pueda afectar el desarrollo o publicación de la investigación y los resultados aquí presentados.

Declaración de la Junta de Revisión Institucional

No aplica.

Declaración de consentimiento informado

No aplica.

Referencias

- [1] S. E. Umbaugh, *Digital Image Processing and Analysis: Computer Vision and Image Analysis*. Boca Raton: CRC Press, 2023, doi: <https://doi.org/10.1201/9781003221135>
- [2] M. Perani, S. Baraldo, M. Decker, A. Vandone, A. Valente, B. Paoli, "Track geometry prediction for Laser Metal Deposition based on on-line artificial vision and deep neural networks", *Robot. Comput.-Integr. Manuf.*, vol. 79, p. 102445, 2023, doi: <https://doi.org/10.1016/j.rcim.2022.102445>
- [3] Q. Li, W. Ge, H. Shi, W. Zhao, S. Zhang, "Research on Coaxiality Measurement Method for Automobile Brake Piston Components Based on Machine Vision", *Appl. Sci.*, vol. 14, no. 6, 2024, doi: <https://doi.org/10.3390/app14062371>
- [4] A. Martini, E. M. Tronci, M. Q. Feng, R. Y. Leung, "A computer vision-based method for bridge model updating using displacement influence lines", *Eng. Struct.*, vol. 259, p. 114129, 2022, doi: <https://doi.org/10.1016/j.engstruct.2022.114129>
- [5] C. Sun, D. Gu, X. Lu, "Three-dimensional structural displacement measurement using monocular vision and deep learning-based pose estimation", *Mech. Syst. Signal Process.*, vol. 190, p. 110141, 2023, doi: <https://doi.org/10.1016/j.ymssp.2023.110141>
- [6] W. He, Z. Jiang, W. Ming, G. Zhang, J. Yuan, L. Yin, "A critical review for machining positioning based on computer vision", *Measurement*, vol. 184, p. 109973, 2021, doi: <https://doi.org/10.1016/j.measurement.2021.109973>
- [7] B. McGuinness, M. Duke, C. K. Au, S. H. Lim, "Measuring radiata pine seedling morphological features using a machine vision system", *Comput. Electron. Agric.*, vol. 189, p. 106355, 2021, doi: <https://doi.org/10.1016/j.compag.2021.106355>

- [8] C. Xi, J. Ruan, A. Liu, "Machine vision-based measurement of air compressor crankshaft journal dimensions", en *Third International Conference on Computer Vision and Pattern Analysis (ICCPA 2023)*, L. Shen y G. Zhong, Eds., Hangzhou, p. 114, 2023, doi: <https://doi.org/10.1117/12.2684335>
- [9] Y. Saif et al., "Roundness Holes' Measurement for milled workpiece using machine vision inspection system based on IoT structure: A case study", *Measurement*, vol. 195, p. 111072, 2022, doi: <https://doi.org/10.1016/j.measurement.2022.111072>
- [10] H. Hu, J. Wang, C.-Z. Dong, J. Chen, T. Wang, "A hybrid method for damage detection and condition assessment of hinge joints in hollow slab bridges using physical models and vision-based measurements", *Mech. Syst. Signal Process.*, vol. 183, p. 109631, 2023, doi: <https://doi.org/10.1016/j.ymssp.2022.109631>
- [11] A. Ugural, *Mechanical Design of Machine Components*. Boca Raton: CRC Press, 2015, doi: <https://doi.org/10.1201/b18000>
- [12] D. G. Ullman, *The Mechanical Design Process*. Independence, Oregon: David Ullman LLC, 2017.
- [13] R. G. Budynas, J. K. Nisbett, *Diseño en ingeniería mecánica de Shigley*, México: McGraw-Hill, 2021.
- [14] R. L. Norton, *Diseño de máquinas: un enfoque integrado*. México, México: Pearson Educación, 2011.
- [15] A. Spring, *Design Handbook: Engineering Guide to Spring Design*. Associated Spring, Barnes Group Inc., 1987.
- [16] ISO, ISO 22705-1 (en), Springs - Measurement and test parameters - Part 1: Cold formed cylindrical helical compression springs, 2021. [En línea]. Disponible en: <https://www.iso.org/es/contents/data/standard/07/37/73723.html>
- [17] ISO, ISO 22705-2 (en), Springs - Measurement and test parameters - Part 2: Cold formed cylindrical helical extension springs, 2023. [En línea]. Disponible en: <https://www.iso.org/es/contents/data/standard/07/89/78984.html>
- [18] Tecniresortes, "Entrevista Gerente General", 2022.
- [19] D. Almeida, M. Ciaccia, D. Ojeda, "Mechanical behavior characterization of helical extension springs manufactured in Ecuador", *Applied Engineering and Innovative Technologies*, 2023, doi: https://doi.org/10.1007/978-3-031-70760-5_20
- [20] "Samsung to Bring Industry's Highest Resolution for Mobile Cameras with New 64Mp ISOCELL Image Sensor". [En línea]. Disponible en: <https://news.samsung.com/global/samsung-to-bring-industrys-highest-resolution-for-mobile-cameras-with-new-64mp-isocell-image-sensor>
- [21] G. Bradski, "The OpenCV Library", Dr Dobbs J. Softw. Tools, 2000.
- [22] Ansys Inc, "Ansys Parametric Design Language guide, version 18.2". 2018.
- [23] Ansys Inc, "Ansys Mechanical APDL command reference, version 18.2". 2018.
- [24] Ansys Inc, "Ansys Mechanical APDL element reference, version 18.2". 2018.
- [25] J. Miao, Q. Tan, B. Sun, J. Zhao, S. Liu, Y. Zhang, "Online measurement method for dimensions of disk parts based on machine vision", *PLOS ONE*, vol. 19, n.o 7, p. e0307525, 2024, doi: <https://doi.org/10.1371/journal.pone.0307525>