

ESCUELA SUPERIOR POLITÉCNICA DEL LITORAL

**Facultad de Ingeniería en Mecánica y Ciencias de la
Producción**

Desarrollo de un prototipo de medición de bajo costo basado en
procesamiento de imágenes para ensayos mecánicos

PROYECTO INTEGRADOR

Previo la obtención del Título de:

Ingeniero Mecánico

Presentado por:

Cynthia Sophia Arellano Benítez

GUAYAQUIL - ECUADOR

Año: 2022

DEDICATORIA

A Dios, a Cecilia y Xavier.

AGRADECIMIENTOS

Agradezco profundamente a Irving David Hernández Fontes, sin su acompañamiento, sabiduría y motivación este trabajo no hubiera sido posible. A los profesores que creyeron en mí y buscaron siempre la manera de ayudarme: Galo Durazno, Andrea Boero, Livingston Castro y Clotario Tapia, a ellos debo este título. A Ricardo Delgado por su incondicional apoyo en este largo camino.

DECLARACIÓN EXPRESA

"Los derechos de titularidad y explotación, me corresponde conforme al reglamento de propiedad intelectual de la institución; *Cynthia Sophia Arellano Benitez* y doy mi consentimiento para que la ESPOL realice la comunicación pública de la obra por cualquier medio con el fin de promover la consulta, difusión y uso público de la producción intelectual"

Sophia Arellano B

Cynthia Sophia Arellano Benitez

EVALUADORES

.....
Francis Loayza., Ph.D.

PROFESOR DE LA MATERIA

.....
Livingston Castro., M.Sc.

PROFESOR TUTOR

RESUMEN

El ensayo de tracción es con certeza el ensayo de materiales más importante en la actualidad para la determinación de propiedades mecánicas de los materiales, tanto a nivel educativo como comercial. Sin embargo, la máquina de ensayos universales no es del todo precisa al momento de adquirir los datos de deformación presentando valores mayores a los existentes en la zona de interés de la probeta. Por ello, este proyecto tiene como objetivo el desarrollo de una metodología de sistema de medición para ensayos de tracción basado en el procesamiento de imágenes para probetas metálicas y plásticas. Esta metodología detalla cada etapa, desde la captura y calibración de las imágenes, hasta su correlación de tensión/esfuerzo con el nivel de carga. Para este trabajo, se utilizaron programas de uso libre como Fiji y Python para el procesamiento de imágenes y análisis de datos respectivamente, además de una cámara web para la captura de imágenes. Para validar la metodología se realizaron ensayos de tracción en los laboratorios de la ESPOL, considerando 4 probetas metálicas y 2 probetas plásticas con diferentes tasas de captura. Los parámetros de estos ensayos fueron obtenidos en base a las normas ASTM E8 e ISO 6259. A partir de los resultados de estos ensayos fueron construidas curvas de esfuerzo versus deformación que representan fielmente el comportamiento típico cada material a la tracción, alcanzando niveles de precisión mayores en comparación con los resultados proporcionados de la máquina de ensayos. A partir de la verificación de los datos es posible concluir que la metodología sistemática de medición por imágenes, para ensayos de tracción, fue alcanzada y es capaz captar el comportamiento característico de los materiales a la tracción. Además, es una alternativa de bajo costo, cuyo valor total es el 3% del costo de su accesorio equivalente en el mercado.

Palabras Clave: Medición por imágenes, ensayo de tracción, Esfuerzo versus Deformación.

ABSTRACT

Nowadays, the tensile test is certainly the most important material test for the determination of the mechanical properties of materials, both at an educational and commercial level. However, the universal testing machine is not completely accurate when acquiring the deformation data, presenting values greater than those existing in the interest of the specimen. For this reason, this project has the objective of developing a measurement system methodology for tensile tests based on image processing for metal and plastic tests, detailing each of its stages, from the capture and calibration of the images to the spatiotemporal synchronization of the recorded data with its tension/stress correlation or load level. Open-source programs such as Fiji and Python were used for image processing and data analysis, respectively, and a web camera for image capture. For the validation of the methodology, tensile tests of 4 metal specimens and 2 plastic specimens were carried out at ESPOL laboratories at different capture rates, where the parameters of the tensile tests were obtained from the ASTM E8 and ISO 6259 standards. For these tests, stress-strain curves were constructed that faithfully represent the typical tensile behavior of each material, reaching higher precision levels compared to the results provided by the testing machine. It is concluded then that a systematic methodology of measurement by images for tensile tests is feasible and can also capture the characteristic behavior of tensile materials. It is also a low-cost alternative, whose total value is 3% of the cost of its equivalent accessory on the market.

Keywords: *Measurement by images, tensile test, Stress-strain curve.*

ÍNDICE GENERAL

RESUMEN.....	I
<i>ABSTRACT</i>	II
ÍNDICE GENERAL.....	III
ABREVIATURAS	VI
SIMBOLOGÍA	VII
ÍNDICE DE FIGURAS.....	VIII
ÍNDICE DE TABLAS	XI
ÍNDICE DE PLANOS	XII
CAPÍTULO 1	13
1. Introducción	13
1.1 Definición del Problema	13
1.2 Justificación del proyecto.....	14
1.3 Objetivos.....	15
1.3.1 Objetivo General	15
1.3.2 Objetivos Específicos	15
1.4 Marco teórico	15
1.4.1 Diagrama Esfuerzo-Deformación	15
1.4.2 El Ensayo de tracción.....	17
1.4.3 Normas para la realización de ensayos de tracción	18
1.4.4 El equipo de ensayos universales y accesorios de medición.....	18
1.4.5 Concepto de imagen e imagen digital	20
1.4.6 Procesamiento digital de imágenes.....	20
1.4.7 Uso de visión artificial para la medición en ingeniería.....	20
1.4.8 Programas.....	21

1.4.9	Herramientas de programación	22
CAPÍTULO 2		23
2.	Metodología	23
2.1	Parámetros de diseño	23
2.1.1	Requerimientos aplicables al proyecto	23
2.1.2	Especificaciones de diseño	25
2.2	Diseño de forma.	26
2.2.1	Lista de objetivos jerárquicos ponderados	26
2.2.2	Descripción de las alternativas de solución propuestas	28
2.2.3	Selección de la mejor alternativa.....	31
2.3	Diseño detallado	32
2.3.1	Etapa 1: Proceso de adquisición de imágenes	33
2.3.2	Etapa 2: Programa y algoritmos de preprocesamiento de imágenes y rectificación de imágenes	37
2.3.3	Etapa 3: Programa de procesamiento de información y creación de curvas	40
CAPÍTULO 3		42
3.	Resultados y Análisis	42
3.1	Aplicación de la metodología en ensayos de tracción	42
3.2	Resultados de la metodología	53
3.3	Resumen de resultados	55
3.4	Validación de resultados: Comparación de curvas de Esfuerzo vs Deformación en metales y plásticos	57
3.5	Costos asociados al proyecto	60
3.6	Análisis de resultados	62
3.6.1	Análisis económico.....	65

CAPÍTULO 4.....	66
4. Conclusiones y recomendaciones.....	66
Conclusiones	66
Recomendaciones	66
BIBLIOGRAFÍA	
APÉNDICES	

ABREVIATURAS

ESPOL	Escuela Superior Politécnica del Litoral
FIMCP	Facultad de Ingeniería Mecánica y Ciencias de la Producción
ASTM	American Society for Testing and Materials
ISO	International Organization for Standardization
ROI	Region of Interest
OpenCV	Open-Source Computer Vision
VCG	Virtual Clip-Gage
INEC	Instituto Nacional de Estadísticas y Censos

SIMBOLOGÍA

pix	Píxel
Hz	Hertz
mm	Milímetro
min	Minutos
MPa	Mega Pascal

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1.1 Probeta de sección transversal estándar según la norma ASTM (Budynas et al., 2008).....	16
Figura 1.2 Diagrama esfuerzo-deformación unitaria obtenidas a partir de un ensayo de tensión. a) material dúctil y b) material frágil (Budynas et al., 2008).....	16
Figura 1.3 Esquema de una máquina de ensayo de tracción (Callister, 2012).....	18
Figura 1.4 Máquina de ensayos universales marca Shimadzu (<i>CFRP-Analysis-Testing-and-Inspection-Evaluation-Instruments.pdf</i> , 2018).....	18
Figura 2.1 Flujograma de la metodología aplicada.	23
Figura 2.2 Caja Negra.....	25
Figura 2.3 Caja transparente.	26
Figura 2.4 Árbol de Función-Medios.	26
Figura 2.5 Funcionamiento de la Alternativa 1: Fotogrametría.	29
Figura 2.6 Funcionamiento de la Alternativa 2: Vídeo extensómetro.....	30
Figura 2.7 Funcionamiento de la Alternativa 2: Correlación Digital de Imágenes.	30
Figura 2.8 Funcionamiento de la Alternativa 4: Contornos.	31
Figura 2.9 Etapas del sistema de medición.	33
Figura 2.10 Esquema físico de la solución propuesta.....	35
Figura 2.11 Dimensiones de las probetas metálicas a ensayar.	35
Figura 2.12 Dimensiones de las probetas plásticas a ensayar.	36
Figura 2.13 Ejemplos de marcadores en probetas metálicas (1 a 3) y plásticas (4)..	36
Figura 2.14 Flujograma de la programación del Virtual Clip Gage en MACROS para Fiji.	37
Figura 2.15 Flujograma del código de extracción de perfiles de intensidad en MACROS para FIJI.....	40
Figura 2.16 Flujograma de código en Python para creación de curvas.	41
Figura 3.1 Toma de medida de referencia en probeta metálica.....	43
Figura 3.2 Colocación del sensor en la máquina de ensayos.....	44
Figura 3.3 Referencia de las imágenes capturadas.....	44
Figura 3.4 Colocación del difusor de luz.	45
Figura 3.5 Algoritmo de captura (OpenCV).....	47

Figura 3.6 Sección del código a editar dependiendo del ensayo.	47
Figura 3.7 Código en MACROS para Fiji VCG.	47
Figura 3.8 Ingreso de datos en el VCG.....	48
Figura 3.9 ROI para sección 3a del VCG.....	49
Figura 3.10 Variables a ingresar de la ROI.....	49
Figura 3.11 ROI a ingresar en punto 3b del código.	49
Figura 3.12 Pasos para correr el algoritmo VCG en Fiji.....	50
Figura 3.13 Resultados del VCG, final del preprocesamiento de la imagen.	50
Figura 3.14 Command Prompt para abrir el notebook de Python.....	51
Figura 3.15 Ventana del navegador con Jupyter abierto.	51
Figura 3.16 Notebook de generación de curvas de deformación.....	52
Figura 3.17 Corrido del programa de obtención de curvas.	52
Figura 3.18 Resultados del código Análisis de datos.....	53
Figura 3.19 Ensayo #1: Probeta de lámina de acero tipo MR de 0.2 mm de espesor con una frecuencia de captura de 2 Hz (5 imágenes por segundo).Figura 3.20 Ensayo #2: Probeta de lámina de acero tipo MR de 0.2 mm de espesor con una frecuencia de captura de 2 Hz (5 imágenes por segundo).....	53
Figura 3.21 Ensayo #3: Probeta de lámina de acero tipo MR de 0.2 mm de espesor con una frecuencia de captura de 5 Hz (10 imágenes por segundo).....	54
Figura 3.22 Ensayo #4: Probeta de lámina de acero tipo MR de 0.2 mm de espesor una frecuencia de captura de 14.28 Hz (15 imágenes por segundo).....	54
Figura 3.23 Ensayo #5: Probeta de tubo de polietileno PE 100 de espesor 3.073 mm y a una frecuencia de captura de 14.28 Hz (15 imágenes por segundo).....	55
Figura 3.24 Ensayo #6: Probeta de tubo de polietileno PE 100 de espesor 3.073 mm y a una frecuencia de captura de 7.14 Hz (7.5 imágenes por segundo).....	55
Figura 3.25 Resumen de resultados de ensayos metálicos con aplicación de filtro Savitzky-Golay. Los a) y b) corresponden a los ensayos a frecuencia de 2 Hz, el c) a una tasa de 5 Hz y finalmente el d) a 14.28 Hz.	56
Figura 3.26 Resumen de resultados plásticos con aplicación de filtro Savitzky-Golay. Ambos a una frecuencia de muestreo de 15 Hz.	56
Figura 3.27 Comparación de resultados de ensayos metálicos para todas las tasas de muestreo en función del porcentaje de deformación.	57

Figura 3.28 Comparación de resultados de ensayos plásticos en función del alargamiento y del porcentaje de deformación.	58
Figura 3.29 Porcentaje de deformación versus tiempo y diferencia porcentual de ensayo metálico a 2 Hz.....	59
Figura 3.30 Porcentaje de deformación versus tiempo y diferencia porcentual de ensayo metálico a 2 Hz.....	59
Figura 3.31 Porcentaje de deformación versus tiempo y diferencia porcentual de ensayo metálico a 5 Hz.....	59
Figura 3.32 Porcentaje de deformación versus tiempo y diferencia porcentual de ensayo metálico a 14.28 Hz.....	60
Figura 3.33 Alargamiento versus tiempo y diferencia porcentual de ensayo plástico a 14.28 Hz.	60
Figura 3.34 Alargamiento versus tiempo y diferencia porcentual de ensayo plástico a 14.28 Hz.	60
Figura 4.1 Ejemplo de capturas de imágenes para rectificación/calibración.....	73

ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 1.1 Metrología por imágenes aplicada en otros campos de la ingeniería	21
Tabla 2.1 Análisis de aspectos aplicables al proyecto.	24
Tabla 2.2 Requerimientos de los aspectos aplicables para el proyecto.....	25
Tabla 2.3 Escala de Saaty para la determinación de pesos ponderados.	27
Tabla 2.4 Tabla de requerimientos ordenada de mayor a menor importancia.....	27
Tabla 2.5 Ponderación de criterios.	27
Tabla 2.6 Pesos ponderados de todos los criterios	28
Tabla 2.7 Matriz de decisión de los criterios.	32
Tabla 2.8 Equipo, Equipo y Programa para la aplicación de la solución.....	34
Tabla 3.1 Costeo de la metodología.	61
Tabla 3.2 Comparación de costos con accesorios del mercado.....	62

ÍNDICE DE PLANOS

N/A

CAPÍTULO 1

1. INTRODUCCIÓN

Las propiedades mecánicas de los materiales como la resistencia, dureza, ductilidad y rigidez son de especial importancia en ingeniería ya que refleja la relación entre fuerza y respuesta del material. Para conocer estas propiedades se realizan ensayos, siendo el más común el de tracción. Estos ensayos se rigen a normas internacionales para su correcta implementación siendo indispensables para cualquier proyecto ingenieril.

Actualmente en Ecuador, existen muy pocos laboratorios certificados para conducir estos ensayos; además, algunas universidades y escuelas de ingeniería carecen de los recursos para obtenerlas. Esto se debe a la fuerte inversión que representa un equipo de ensayos universales de alta precisión de 50 KN, cuyo valor estimado es de \$60000 dólares americanos, más aún si el objetivo del equipo es netamente académico y no se recupera la inversión con trabajos para la industria.

Se han realizado ya muchos diseños de máquinas de ensayos de tracción con relativamente poca inversión, sin embargo, la forma en la que se obtiene la curva de deformación sigue siendo poco precisa. Por ello, existen accesorios adicionales como: extensómetros, galgas extensométricas, láser o cámaras de video, que mejoran la precisión elevando el costo del equipo.

1.1 Definición del Problema

De modo general, las máquinas de ensayos de tracción relacionan el alargamiento medido en las probetas ensayadas con el avance de la rosca de los tornillos de potencia, se cuenta el ángulo de rotación con sensores magnéticos o fotoeléctricos a través del conteo de dientes que pasan por el sensor. Sin embargo, esta forma de medición no es del todo precisa ya que no considera los errores generados en las mordazas de agarre que presentan resbalamientos durante el ensayo, o posibles espacios ("Gaps") en la configuración global de los ensayos.

Además, las técnicas experimentales que se aplican comúnmente a los ensayos mecánicos son intrusivas y muchas de las veces pierden datos

relevantes de la región con comportamiento elastoplástico/plástico de los materiales.

Todo esto puede generar errores en el comportamiento real del material estudiado, reportando muchas de las veces resultados con alta incertidumbre. Para mitigar este tipo de incerteza en los datos, se instalan galgas extensométricas (strain-gauges) unidireccionales o bidireccionales en los cuerpos de las probetas de ensayo, y transductores de desplazamiento conocidos como “Clip-gages” para mejorar la precisión de los resultados, aun cuando estos son costosos e intrusivos.

1.2 Justificación del proyecto

El ensayo de tracción es con certeza el ensayo de materiales más importante en la actualidad ya que permite caracterizar el comportamiento mecánico de los materiales en tensión o compresión. Este ensayo es fundamental para diseño mecánico y civil, sin él, no sería posible desarrollar ningún diseño con el nivel de confiabilidad requerida.

El desarrollo de este tema se justifica una vez que permite la adquisición de datos de interés en ensayos de tracción de materiales, sin la necesidad de equipos o sensores excesivamente costosos, o instalaciones intrusivas con las probetas, permitiendo conocer informaciones del estado de material, y configuración de las probetas, en cada instante de tiempo.

Este proyecto propone el desarrollo de una metodología sistemática para medición basada en el procesamiento de imágenes; detallando cada una de sus etapas, desde la captura y calibración de las imágenes, hasta la correlación de tensión/esfuerzo o nivel de carga. Además, esta propuesta realiza el estudio de diferentes frecuencias de captura del dispositivo principal, para facilitar la comprensión detallada del comportamiento del material.

1.3 Objetivos

1.3.1 Objetivo General

Desarrollar una metodología de medición basado en el procesamiento de imágenes digitales de probetas metálicas y plásticas para la estimación de la deformación de la probeta durante ensayos de tracción.

1.3.2 Objetivos Específicos

1. Desarrollar una metodología para la adquisición de imágenes.
2. Establecer un protocolo de calibración de imágenes para el sistema de adquisición.
3. Elaborar un algoritmo básico de procesamiento de imágenes en lote basado en el análisis de contornos para la medición de desplazamientos en ensayos de tracción.

1.4 Marco teórico

1.4.1 Diagrama Esfuerzo-Deformación

Del texto (Budynas et al., 2008) se muestra la forma típica de una probeta para ensayo de tracción y sus dimensiones características según el estándar de la ASTM, ver Figura 1.1. El diámetro inicial d_0 y la longitud calibrada l_0 se registran previo al inicio de la prueba y se utilizan para determinar posteriormente las deflexiones presentadas durante el ensayo. Se coloca la probeta en la máquina de ensayos y la carga P es aplicada, de estas variables se obtiene el esfuerzo σ mediante la Ecuación 1.1 donde A_0 es el área inicial de la probeta antes de ser cargada.

$$\sigma = \frac{P}{A_0} \quad (1.1)$$

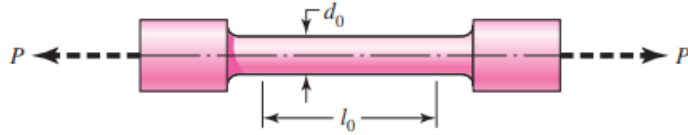


Figura 1.1 Probeta de sección transversal estándar según la norma ASTM (Budynas et al., 2008).

Durante la aplicación de la fuerza, la probeta se alarga un valor único para cada valor de fuerza llamado deflexión. De esta nueva variable se determina la deformación unitaria que se calcula con la Ecuación 1.2.

$$\epsilon = \frac{l-l_0}{l_0} \quad (1.2)$$

Durante la prueba se obtienen distintos valores de esfuerzo para cada fuerza aplicada y a ellos corresponde un valor de deformación unitaria. Con estos datos tabulados se grafica entonces un diagrama esfuerzo-deformación unitaria, se muestran en la Figura 1.2 diagramas típicos de materiales dúctiles y frágiles siendo los dúctiles los que se deforman más (como los polímeros).

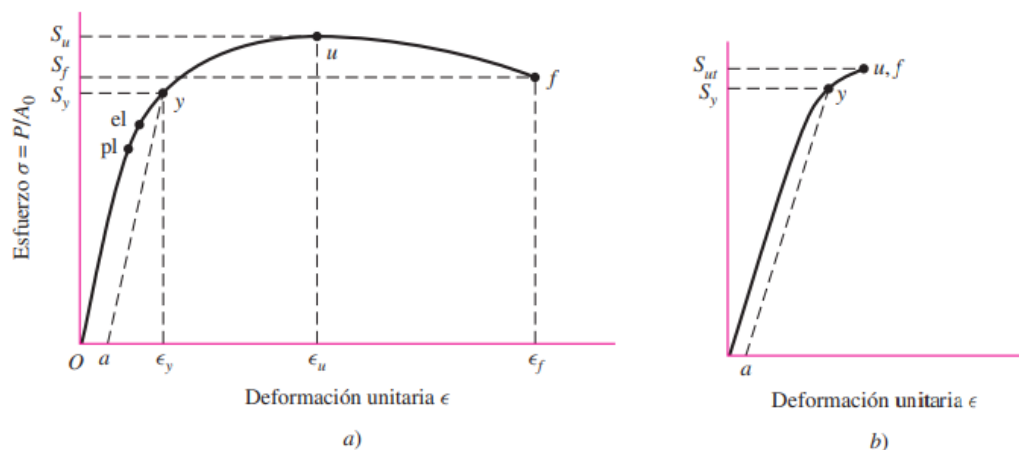


Figura 1.2 Diagrama esfuerzo-deformación unitaria obtenidas a partir de un ensayo de tensión. a) material dúctil y b) material frágil (Budynas et al., 2008).

Existen diferentes zonas y puntos de interés en las gráficas esfuerzo-deformación de los materiales. En la Figura 1.2 a) se observa graficado el

punto p_l que representa el final de un comportamiento lineal del material, donde la relación esfuerzo/deformación está dada por la llamada Ley de Hooke (Ecuación 1.3). A este punto se lo conoce como límite proporcional.

$$\sigma = E\epsilon \quad (1.3)$$

La pendiente de esta recta E se conoce como módulo de Young y es la medida de rigidez del material y una de las variables más importantes a determinar en estos ensayos. Otro punto de interés en la gráfica 1.2 a) es e_l y se conoce como límite elástico. Pasados de este punto, el material se habrá deformado plásticamente y no volverá a tomar su estado original al retirar la carga aplicada. En un punto en el eje x igual al 2% de la longitud calibrada y paralela a la pendiente del comportamiento lineal, se encuentra una recta que corta a la curva esfuerzo-deformación en las Figuras 1.2 a, b. Este punto S_y se conoce como resistencia a la fluencia y a partir de este, la deformación unitaria comenzará a crecer rápidamente sin observar grandes variaciones en el esfuerzo. Finalmente, el punto S_u o S_{ut} es el esfuerzo máximo alcanzado en el diagrama, para este punto, la probeta se ha fracturado.

1.4.2 El Ensayo de tracción

Del libro (Callister, 2012), el ensayo de tracción se realiza a fin de determinar la curva esfuerzo-deformación de un material sometido a una carga uniaxial. Durante el ensayo, se aplica carga de tracción con incrementos progresivos y controlados de fuerza o desplazamiento (deformación) hasta alcanzar la rotura en el caso de metales, o hasta alcanzar un porcentaje de elongación, en el caso de plásticos. En la Figura 1.3, se muestra un esquema de una típica máquina de ensayos de tracción, la fuerza en la probeta es aplicada por el movimiento descendente del cabezal móvil y la celda de carga y extensómetro miden la fuerza aplicada y el alargamiento de la probeta respectivamente.

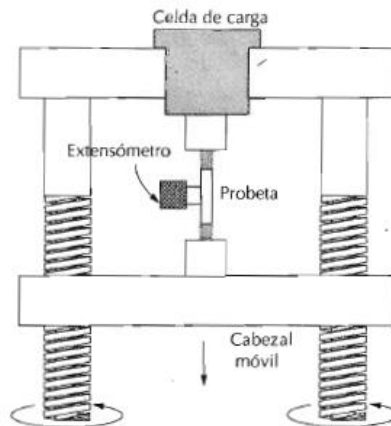


Figura 1.3 Esquema de una máquina de ensayo de tracción (Callister, 2012).

1.4.3 Normas para la realización de ensayos de tracción

El ensayo de tracción y la probeta se rigen a normas internacionales, como la ASTM E-8/8M (E28 Committee, 2021) para metales y la ISO 6259-3 (ISO 6259-3:2015(en),2015) para plásticos. Estas normas detallan las características de las probetas para normalización de la metodología de ensayos, permitiendo que los valores característicos a determinar sean comparables y congruentes aun usando distintos tipos de máquinas de ensayos.

1.4.4 El equipo de ensayos universales y accesorios de medición



Autograph Precision Universal Tester
AG-X plus

**Figura 1.4 Máquina de ensayos universales marca Shimadzu (CFRP-
Analysis-Testing-and-Inspection-Evaluation-Instruments.pdf, 2018).**

Para la realización de ensayos de tracción, el Laboratorio de Sólidos de la FIMCP cuenta con un equipo electromecánico de ensayos universales

SHIMADZU, que se observa en la Figura 1.3, modelo AG-IS con capacidad de hasta 50 kN. Este equipo es capaz de realizar una amplia gama de ensayos, de acuerdo con las normas ISO 527, ISO 178 y JIS K 7171.

El equipo de ensayos registra en tiempo real los parámetros de fuerza y desplazamiento de la celda de carga y el actuador hidráulico, y permiten realizar el control automatizado de deformaciones de acuerdo con la norma ISO 6892-2009 (*ISO 6259-3:2015(en)*,2015). La precisión de la celda de carga se encuentra en el rango $\pm 0.5\%$ que proporciona alta confiabilidad en la ejecución de este tipo de ensayos. La velocidad del ensayo es otra característica importante, este equipo permite velocidades de medición de hasta 26.66 mm/s.

Según el fabricante (*CFRP*, 2018), este equipo trabaja con el programa TRAPEZIUM X, que permite definir todos los requerimientos del ensayo, así como observar en tiempo real los resultados y generar reportes de forma automática.

Es de interés particular conocer el modo en que este equipo registra las variables de interés. Los extensómetros son equipos de medición empleados durante los ensayos para medir cambios en la longitud de un objeto. La ESPOL trabaja con un extensómetro clip-on que mide de la posición relativa entre dos mordazas instaladas en el cuerpo de las probetas.

También existen dispositivos digitales como: extensómetros por brazo sensor, el extensómetro láser y el extensómetro de video. El extensómetro por brazo se aplica mediante un sistema motorizado y sincronizado con los datos correspondientes de fuerza del equipo de ensayos. El extensómetro de láser realiza mediciones en ciertos materiales con base en la iluminación de la superficie de la probeta con un patrón láser, los reflejos son registrados por dispositivo óptico (cámara) y posteriormente segmentados y correlacionados con las variaciones en la geometría del cuerpo y el patrón

proyectado. Finalmente, el extensómetro de video realiza mediciones con base en la captura continua de imágenes a lo largo del ensayo, utilizando un capturador de fotogramas o una cámara de video digital conectada a una PC. En la muestra se dibujan marcadores especiales y son estos marcadores en la imagen capturada los cuales se rastrean constantemente en el video capturado

1.4.5 Concepto de imagen e imagen digital

Del libro (Gonzalez & Woods, 2018), una imagen puede ser definida matemáticamente como una función bidimensional $f(x, y)$, donde x y y son coordenadas espaciales (en un plano), y f en cualquier par de coordenadas es la intensidad o nivel de gris de la imagen en esa coordenada. Cuando x y y los valores de f son todas cantidades finitas, discretas, decimos que la imagen es una imagen digital. Una imagen digital se compone de un número finito de elementos, cada uno con un lugar y valor de intensidad específicos. Estos elementos son llamados pixeles.

1.4.6 Procesamiento digital de imágenes

El procesamiento digital de imágenes es todo procedimiento computacional aplicado a una imagen para realizar operaciones como reducción del ruido, mejora en los niveles de contraste y nitidez, pasando por abordajes de segmentación, descripción de objetos y el procesamiento informático (donde la salida son bordes, contornos y objetos individuales), hasta dar significado al conjunto de objetos identificados (lo que se conoce como análisis de imágenes), llegando a realizar funciones cognitivas similares a la visión humana.

1.4.7 Uso de visión artificial para la medición en ingeniería

Previamente se ha utilizado el análisis y procesamiento de imágenes para mediciones de precisión en diversas áreas de la ingeniería. La Tabla 1.1 detallan algunos artículos que muestran diferentes aplicaciones de este tipo de metodología.

Tabla 1.1 Metrología por imágenes aplicada en otros campos de la ingeniería

Tema	Método	Resultados
Sistema de medición de distancia mediante imágenes para determinar la posición de una esfera utilizando el sensor Kinect XBOX. (Rodríguez Zalapa et al., 2014)	Se presentó un método para medir la distancia del centroide de un objeto segmentado en una imagen de color con respecto a un punto de referencia fijo.	Las mediciones realizadas tuvieron un error menor a 1.64% con un nivel de precisión más alto que el instrumento utilizado de referencia, en un rango de distancia de 0 a 1340 mm.
Enfoque basado en imágenes tridimensionales para estructuras imperfectas modelado de superficies (Hernández et al., 2019).	Describe un enfoque para obtener geometrías tridimensionales a partir de un conjunto de fotografías, combinando el uso de pasos algorítmicos de técnicas de estructura a partir de movimiento (SfM) y estéreo multivista (MVS)	Los resultados de validan la posibilidad de crear prototipos de superficies geométricas a partir de programa de dominio público con un nivel de precisión aceptable.
Análisis de nivel virtual aplicado a experimentos de canales de olas: El caso de las ondas-cuboides homogéneas de cresta baja Interacción de estructuras (Escudero et al., 2021).	Con un video grabado de los experimentos, calibración de imagen, procesamiento, y se implementaron etapas de análisis para analizar el desempeño del HLCS en la reducción de olas elevaciones y estudiar la estabilidad de las unidades blindadas.	La detección de interfaz entre componentes de la escena es útil para observar el comportamiento de las estructuras costeras, aumentando la efectividad y alternativas para adquirir datos precisos en pruebas experimentales 2D.

1.4.8 Programas

Según Bailer (2006), el programa de procesamiento y análisis de imágenes Fiji es un programa que puede mostrar, editar, analizar, procesar, guardar e imprimir imágenes de 8 bits, 16 bits y 32 bits. Admite conjuntos de imágenes llamados "stacks", que comparten una sola ventana. Se pueden desarrollar plugin personalizados para los procesos de adquisición, análisis y procesamiento utilizando el editor de código incorporado y el compilador de Java. Los complementos escritos por el usuario permiten resolver casi cualquier problema de análisis o procesamiento de imágenes.

Otra herramienta libre de modelado y análisis es "Tracker, esta vez de vídeo, elaborada en JAVA proveniente de OSP. Este programa permite crear modelos de partículas basados en las Leyes de Newton y se desarrolló con fines educativos para entender fenómenos físicos reales.

1.4.9 Herramientas de programación

Según Gracia (2013), OpenCv es una librería desarrollada por Intel, un programa libre y de código abierto de visión artificial que nace en 1999 y desde entonces fue ampliamente adoptada para diversas aplicaciones asociadas con la detección de movimiento, reconstrucción 3D, y aprendizaje de maquina a partir de conjuntos de imágenes y sistemas de visión artificial. Esta librería es multiplataforma y cuenta con documentación constantemente actualizada para permitir su uso por desarrolladores en cualquier área de estudio. Los códigos de la librería están desarrollados básicamente en C++ pero debido al alcance del lenguaje Python, todos los códigos en este y otros lenguajes de programación, con orientación a objetos, fueron traducidos y alocados en los repositorios oficiales.

En la página web (*Qué es Visual Studio Code y qué ventajas ofrece, 2022*), se describe que Visual Studio Code (VS Code) es un programa libre y un editor de código fuente desarrollado por Microsoft. Está disponible para Windows, cuenta con soporte para depuración de código, y dispone de un sinnúmero de extensiones, otorgando la posibilidad de escribir y ejecutar código en cualquier lenguaje de programación.

CAPÍTULO 2

2. METODOLOGÍA

La metodología adoptada para determinar un protocolo de medición para ensayos de tracción se ilustra brevemente en la Figura 2.1.

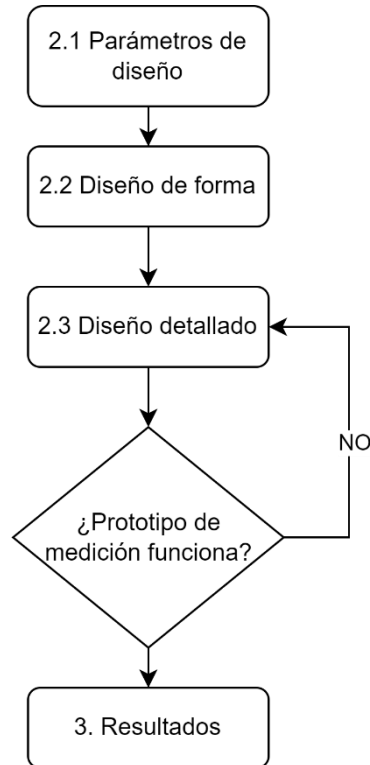


Figura 2.1 Flujograma de la metodología aplicada.

2.1 Parámetros de diseño

Los parámetros de diseño se establecen mediante entrevistas con el cliente, y en base al análisis de ocho aspectos: salud pública, seguridad y bienestar, aspectos globales, culturales, sociales, ambientales, económicos y técnicos. De ellos se extrae información para enlistar las especificaciones del producto.

2.1.1 Requerimientos aplicables al proyecto

Se analizan los aspectos anteriormente mencionados y se determinan si son aplicables al proyecto y por qué lo son. Para los aspectos no aplicables se explica porque no lo son.

Tabla 2.1 Análisis de aspectos aplicables al proyecto.

Aspecto	¿Es aplicable?	¿Por qué es o no es aplicable?
Salud Pública	No	Este proyecto no genera aportes en la salud pública nacional o internacional ya que se desarrolla en las áreas de diseño, ciencia de materiales e ingeniería mecánica.
Seguridad y Bienestar	Si	El desarrollo de métodos de medición de las propiedades de los materiales se encuentra dentro del área de seguridad y bienestar ya que aporta al diseño de ingeniería confiable y seguro.
Globales	Si	Porque el área de estudios en la que se desarrolla el proyecto se está estudiando actualmente en algunos laboratorios del mundo, por lo que este proyecto puede ser comercializable.
Culturales	Si	Abre nuevas ramas de estudio enriqueciendo el conocimiento para los ecuatorianos
Sociales	Si	La metodología desarrollada en este proyecto es publicable en revistas de ciencia y tecnología por lo que puede establecer redes y acuerdos de colaboración con diferentes organizaciones.
Ambientales	Si	Esta metodología permite reutilizar herramientas disponibles generando el mínimo de desechos ambientales además de que permite realizar nuevos análisis a partir de la misma probeta ensayada sin necesidad de generar más desechos al ensayar nuevas probetas.
Económicos	Si	Es aplicable ya que se debe analizar la facilidad del acceso al Equipo utilizado y la aplicabilidad en el mercado de la solución seleccionada.
Técnicos	Si	Aplica al proyecto ya que la solución debe cumplir con normativas internacionales y requerimientos de instalación y funcionamiento.

Finalmente, se toman en cuenta exclusivamente los aspectos aplicables al proyecto y se determinan en la Tabla 2.2 los correspondientes requerimientos.

Tabla 2.2 Requerimientos de los aspectos aplicables para el proyecto.

Aspectos aplicables al proyecto	Requerimientos
Seguridad y Bienestar	Sistema con respuesta de alta confiabilidad
	Sistema que no genere ruido
Globales	Equipo de bajo costo
	Sistema replicable internacionalmente
	Uso de programa libre (gratis)
Culturales	Lenguaje de programación utilizado en ESPOL
Sociales	Solución con posibilidad de divulgación científica
Ambientales	Largo ciclo de vida de la metodología y equipo
	Mínimo consumo de energía eléctrica
	Sistema que no genere desechos tóxicos
Económicos	Equipo con disponibilidad en el mercado
	Bajo costo de operación
	Bajo costo de repuestos
Técnicos	Facilidad de instalación
	Capacidad para testear todo tipo de materiales (dúctiles y frágiles)
	Solución integral
	Facilidad de uso para el operador
	Adaptable a cualquier máquina de ensayos
	Códigos editables
	Peso menor a 5 kg

2.1.2 Especificaciones de diseño

Los diagramas que se muestran en las Figuras 2.2 y 2.3 conceptualizan la funciones que deberán ser cumplidas por el prototipo de adquisición.



Figura 2.2 Caja Negra.

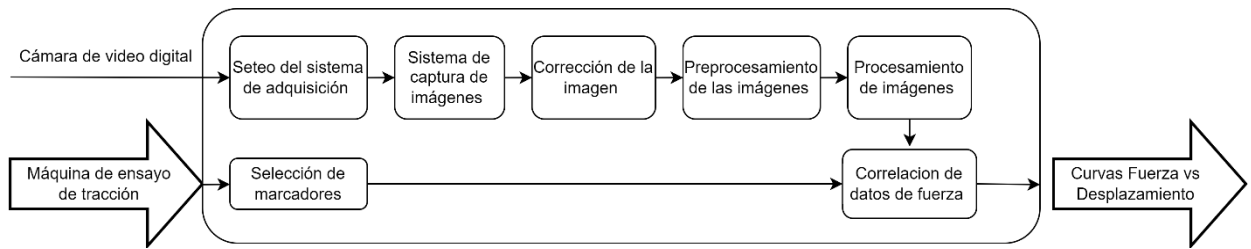


Figura 2.3 Caja transparente.

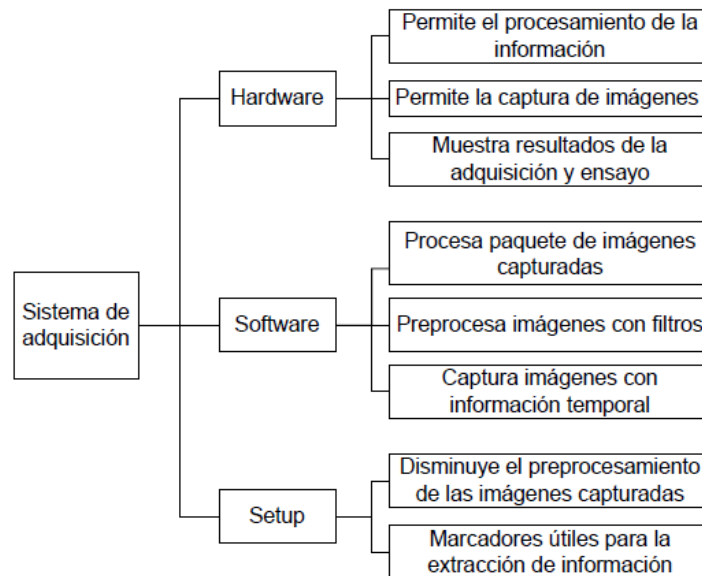


Figura 2.4 Árbol de Función-Medios.

2.2 Diseño de forma.

Conociendo los requerimientos, funciones y especificaciones del diseño de la solución, se muestran 4 alternativas de solución para el problema planteado. A partir de ellas se procedió a realizar una evaluación entre pares y seleccionar la mejor alternativa haciendo uso de una matriz de decisión con calificación ponderada.

2.2.1 Lista de objetivos jerárquicos ponderados

Se utilizó el método de jerarquía analítica para determinar la importancia relativa entre los requerimientos. Para ello se utiliza la escala de Saaty que se muestra en la Tabla 2.3. Las Tablas 2.4 y 2.5 se muestra la comparación de criterios.

Tabla 2.3 Escala de Saaty para la determinación de pesos ponderados.

Valor de Escala	Escala verbal de la preferencia	Definición
1	Igual	Ambos elementos son de igual importancia
3	Moderada	Moderada importancia de un elemento sobre otro
5	Fuerte	Importancia fuerte de un elemento sobre otro
7	Muy Fuerte	Importancia demostrada de un elemento sobre otro
9	Extrema	Importancia absoluta de un elemento sobre otro
2,4,6,8	Términos medios	Valores intermedios que se emplean para expresar preferencias que se encuentran entre dos de las indicadas anteriormente
1/valor de escala	Recíprocos	Para la comparación inversa de los objetivos

Tabla 2.4 Tabla de requerimientos ordenada de mayor a menor importancia.

Requerimientos	
A	Técnicos
B	Económicos
C	Ambientales
D	Globales
E	Culturales
F	Sociales
G	Seguridad y Bienestar

Tabla 2.5 Ponderación de criterios.

Requerimientos	A	B	C	D	E	F	G	Total	Peso ponderado
A	1.00	5.00	5.00	7.00	9.00	9.00	1.00	37.00	0.25
B	0.20	1.00	9.00	5.00	9.00	9.00	1.00	34.20	0.23
C	0.20	0.11	1.00	3.00	7.00	9.00	0.20	20.51	0.14
D	0.14	0.20	0.33	1.00	5.00	9.00	0.14	15.82	0.11
E	0.11	0.11	0.14	0.20	1.00	5.00	0.11	6.68	0.04
F	0.11	0.11	0.11	0.11	0.20	1.00	0.11	1.76	0.01
G	1.00	1.00	5.00	7.00	9.00	9.00	1.00	33.00	0.22
Total								148.96	1

Una vez ponderados los criterios, se enlistan en la Tabla 2.6 los criterios y sus respectivos pesos.

Tabla 2.6 Pesos ponderados de todos los criterios

Criterio de selección	Peso	%
Técnicos	0.25	25
Capacidad para testear todo tipo de materiales (dúctiles y frágiles)	0.1	10
Facilidad de uso para el operador	0.06	6
Facilidad de instalación	0.05	5
Solución integral	0.04	4
Económicos	0.23	23
Equipo con disponibilidad en el mercado	0.1	10
Bajo costo de operación	0.1	10
Bajo costo de repuestos	0.03	3
Seguridad y bienestar	0.22	22
Sistema con respuesta de alta confiabilidad	0.15	15
Sistema que no genere ruido	0.07	7
Ambientales	0.14	14
Mínimo consumo de energía eléctrica	0.07	7
Largo ciclo de vida de la metodología y equipo	0.06	6
Sistema que no genere desechos tóxicos	0.01	1
Globales	0.11	11
Uso de programa libre (gratuito)	0.05	5
Equipo de bajo costo	0.05	5
Sistema replicable internacionalmente	0.01	1
Culturales	0.04	4
Lenguaje de programación utilizado en Espol	0.04	4
Sociales	0.01	1
Solución con posibilidad de divulgación científica	0.01	1

2.2.2 Descripción de las alternativas de solución propuestas

Alternativa 1: Fotogrametría

Se basa en la equi polaridad de objetos identificados/descritos en n-planos o n-escenas capturadas de n-cámaras. La principal ventaja del sistema de fotogrametría es permitir la evaluación precisa de medidas en espacios 2D y 3D, bien como permitir reconstrucciones y análisis de desvíos en 3D. Como desventaja, este sistema requiere más de una cámara digital de alta resolución/velocidad y todas las capturas deben estar sincronizadas, para lo que son necesarios equipos sincronizadores y programas refinados para desarrollar un procesamiento avanzado. Aun cuando es un método útil para

mediciones de objetos cuasi estáticos, no es tan útil al momento de realizar mediciones dinámicas de diferentes objetos como es el requerimiento del proyecto.

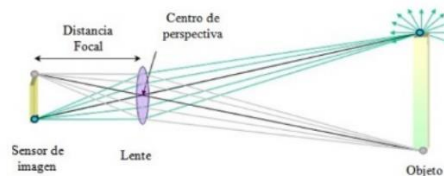


Figura 2.5 Funcionamiento de la Alternativa 1: Fotogrametría.

Alternativa 2: Video extensómetro

Requiere sistemas de captura global, sistemas de refrigeración y espacio de instalación considerable, además genera capturas de por lo menos 25 cuadros por segundo, junto con sistemas FPGA (Field Programmable Gate Arrays). El video extensómetro tiene como ventaja el adquirir imágenes con mayores tasas de cuadros por segundo, tener un sistema de procesamiento de alto desempeño y salidas de conjuntos de imágenes con alta resolución, además, no requiere programas de captura o de sincronización. Sin embargo, para elevadas tasas de cuadros por segundo (>120 cuadros/s) se requieren sistemas de refrigeración. Los paquetes de imágenes capturados ocupan mucho espacio en la memoria por cada ensayo, haciendo poco conveniente su almacenamiento por largos periodos de tiempo. Las imágenes deben extraerse de forma individual si se desea un análisis más profundo y requiere de algoritmos adicionales para el procesamiento como Von Karman o Median-Shift. Finalmente, los equipos de captura son costosos y los más económicos suelen tener un corto tiempo de vida.



Figura 2.6 Funcionamiento de la Alternativa 2: Vídeo extensómetro.

Alternativa 3: Correlación Digital de Imágenes

Este sistema se basa en la correlación cruzada entre sectores definidos como malla en una imagen de referencia, y su desvío consecutivo en las imágenes subsecuentes. La correlación digital de imágenes permite la evaluación precisa de medidas en espacios 2D y 3D, puede realizar análisis de campos de deformaciones y tensiones. Admite análisis globales y puntuales, así como el cálculo de velocidades y aceleraciones en partículas. Sin embargo, los tiempos de procesamiento son elevados, requiere de un patrón aleatorio sobre la región de interés además de una calibración precisa, los algoritmos son complejos y exige del usuario conocimiento previo en mallado de estructuras, así como de tratamiento y análisis de imágenes.

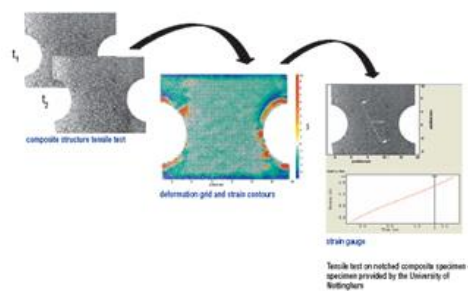


Figura 2.7 Funcionamiento de la Alternativa 2: Correlación Digital de Imágenes.

Alternativa 4: Contornos

Se basa en la detección de características morfológicas, binarias o no, de una imagen, permitiendo un alto desempeño con poco esfuerzo computacional. Sin embargo, son dependientes de la preparación previa del objeto a ser ensayado y supervisado. La alternativa de solución de detección de contornos permite trabajar con videos y/o secuencias de imágenes, tiene un alto desempeño basado en segmentación binaria u operaciones globales de detección de bordes, requiere conocimiento básico de propiedades de imágenes, así como de programación y puede ser implementada en diversos lenguajes de programación de código abierto. Existen programas gratuitos especializados en análisis de imágenes, con una gran comunidad educativa activa y la captura de imágenes puede ser realizada desde cualquier dispositivo. El desarrollo de prototipos es de bajo costo. No obstante, se pueden capturar exclusivamente objetos bidimensionales o planos tridimensionales por ortogonalidad, requiere intervención del usuario para la preparación previa a la captura, además de marcadores adheridos en las probetas. Finalmente, es indispensable de la intervención del usuario al inicio del procesamiento de imágenes por lo que debe dominar el proceso y la metodología del sistema de captura.

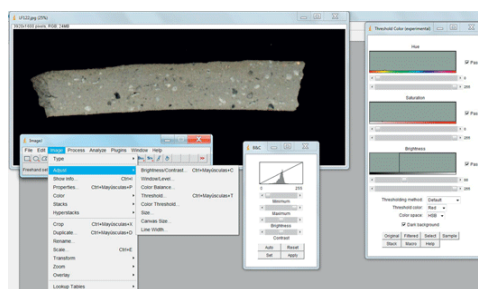


Figura 2.8 Funcionamiento de la Alternativa 4: Contornos.

2.2.3 Selección de la mejor alternativa

Finalmente, la Tabla 2.6 resume las alternativas de solución descritas a partir de una matriz de decisión de pesos ponderados.

Tabla 2.7 Matriz de decisión de los criterios.

Criterio de selección	%	ALTERNATIVAS							
		Fotogrametría		Video Extensómetro		Correlación Digital de Imagen		Contornos	
		Nota	Peso	Nota	Peso	Nota	Peso	Nota	Peso
Sistema con respuesta de alta confiabilidad	15	5	75	5	75	5	75	5	75
Capacidad para testear todo tipo de materiales (dúctiles y frágiles)	10	5	50	5	50	5	50	5	50
Equipo con disponibilidad en el mercado	10	5	50	5	50	5	50	5	50
Bajo costo de operación	10	3	30	3	30	1	10	5	50
Sistema que no genere ruido	7	5	35	1	7	5	35	5	35
Mínimo consumo de energía eléctrica	7	3	21	1	7	3	21	5	35
Facilidad de uso para el operador	6	3	18	1	6	1	6	3	18
Largo ciclo de vida de la metodología y equipo	6	5	30	3	18	5	30	5	30
Facilidad de instalación	5	3	15	5	25	5	25	3	15
Uso de programa libre (gratis)	5	3	15	1	5	3	15	5	25
Equipo de bajo costo	5	1	5	1	5	3	15	5	25
Solución integral	4	5	20	5	20	5	20	5	20
Lenguaje de programación utilizado en Espol	4	3	12	1	4	1	4	5	20
Bajo costo de repuestos	3	1	3	1	3	1	3	5	15
Sistema que no genere desechos tóxicos	1	5	5	3	3	5	5	5	5
Sistema replicable internacionalmente	1	5	5	5	5	5	5	5	5
Solución con posibilidad de divulgación científica	1	5	5	5	5	5	5	5	5
Calificación total	100	394		318		374		478	
Posición		2		4		3		1	

Escala de calificación	5	Alto
	3	Medio
	1	Bajo

2.3 Diseño detallado

Siendo la alternativa 4 la que obtuvo mayor calificación en la matriz de decisión, alternativa que se enfoca en el análisis de contornos de imágenes adquiridas de forma consecutiva. Se desarrolla una metodología detallada del procedimiento en esta sección.

En la Figura 2.9 se muestra un diagrama del sistema de medición por etapas desde la de adquisición de imágenes, preprocesamiento de imágenes, extracción de datos y procesamiento de estos para la obtención de las curvas de resultados.

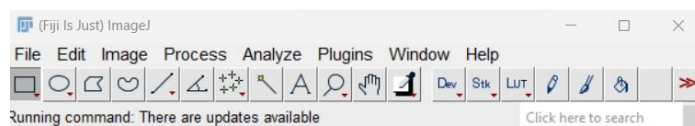
Etapa 1: Proceso de adquisición de imágenes



En esta etapa se detallan desde el equipo necesario para la adquisición de imágenes, la preparación de la probeta a testear, la configuración física de la solución propuesta hasta el algoritmo de captura.



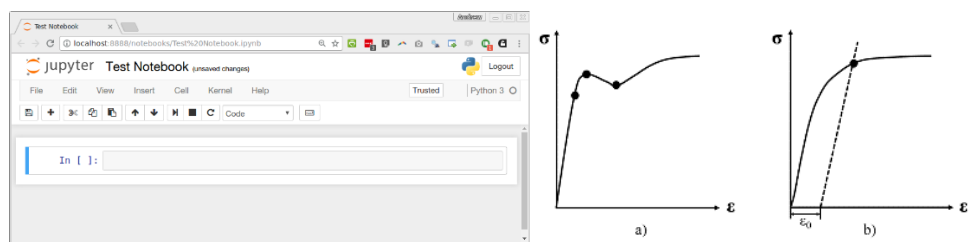
Etapa 2: Programa de preprocesamiento de imágenes



En esta sección se detalla la metodología del preprocesamiento de las imágenes para probetas metálicas y plásticas y los dos algoritmos que se utilizan junto a Fiji (ImageJ).



Etapa 3: Programa de procesamiento de información y creación de curvas



En esta etapa se procesan los perfiles de intensidad obtenidos en la etapa previa y se detectan los picos de intensidad y su distancia relativa por medio de un código en Python obteniendo finalmente curvas de deformación relativa y porcentual.

Figura 2.9 Etapas del sistema de medición.

2.3.1 Etapa 1: Proceso de adquisición de imágenes

En la Tabla 2.8, se muestran los elementos físicos necesarios para la correcta aplicación de la metodología.

Tabla 2.8 Equipo, Equipo y Programa para la aplicación de la solución.

Equipo
La lámpara LED (tipo O-Ring) de mínimo 2500 lúmenes.
Un vernier mecánico o digital.
Un tablero de calibración.
Difusor de luz de 30 x 30 cm.
Tela para contraste de imágenes 120 x 80 cm.
Base de cámara de 1.0 m a 1.8 m de altura.
Marcador para metal
Tablero de calibración
Stickers redondos de colores fluorescentes
Esmalte de uñas color rojo
Cámara web de la marca Logitech modelo HD Pro C920 con conexión USB de resolución de hasta 1920x1080 píxeles y frecuencia de ~25 Hz.
Una PC con mínimo de 8 Gb de memoria RAM y 200 Gb en disco disponibles.
Comunicación USB 2.0 o superior entre el dispositivo de captura (cámara digital) y el dispositivo de almacenamiento (PC).
Programa
Visual Studio Code Python (Librería OpenCV)

La configuración del sistema de adquisición de imágenes se muestra en la Figura 2.10. La colocación del trípode y de cámara depende exclusivamente del ensayo. Para materiales dúctiles, la cámara debe colocarse alejada de la probeta de manera que alcance a capturar el alargamiento completo de la probeta, este es el caso de los plásticos. En metales, por el contrario, la cámara deberá colocarse muy cerca de la probeta ya que las deformaciones son pequeñas y se requiere una mayor relación de píxeles/mm para garantía del mínimo de desvío en las mediciones registradas.

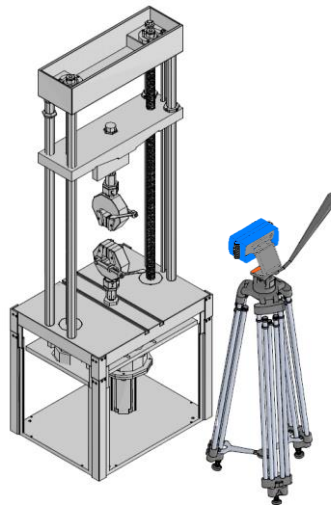


Figura 2.10 Esquema físico de la solución propuesta.

Preparación de la probeta a ensayar

Como se mencionó en el capítulo anterior, se siguen normativas internacionales para la correcta implementación de los ensayos. En la Figura 2.11 se muestra la forma de una probeta metálica fabricada con base a las indicaciones de la norma ASTM E8 (E28 Committee, 2021).

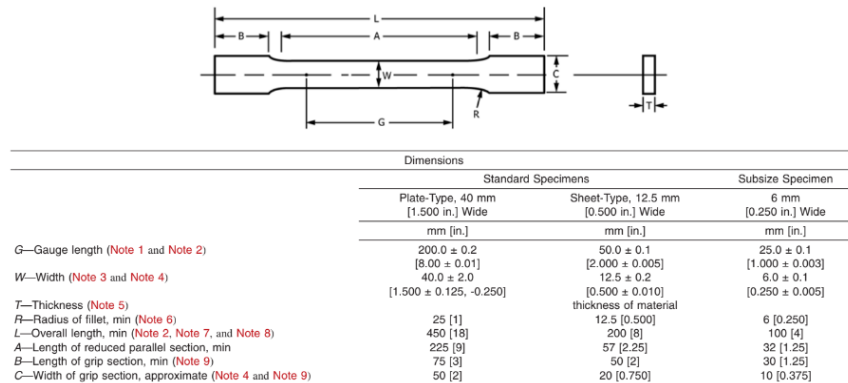


Figura 2.11 Dimensiones de las probetas metálicas a ensayar.

Para los plásticos fue usada la norma ISO 6259-3 (ISO 6259-3:2015(en),2015) que guía la determinación de las propiedades de tracción de tubos termoplásticos cuya forma se muestra en la Figura 2.12.

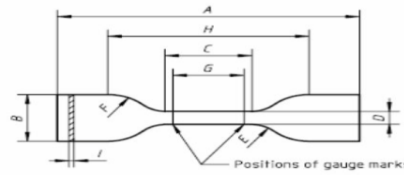


Figure 2 — Type 2 test piece

Table 2 — Dimensions of Type 2 test pieces

Symbol	Description	Dimensions mm
A	Overall length (min.)	115
B	Width of ends	25 ± 1
C	Length of narrow, parallel-sided portion	33 ± 2
D	Width of narrow, parallel-sided portion	6+0.4 0
E	Small radius	14 ± 1
F	Large radius	25 ± 2
G	Gauge length	25 ± 1
H	Initial distance between grips	80 ± 5
I	Thickness	that of the pipe

Figura 2.12 Dimensiones de las probetas plásticas a ensayar.

La metodología requiere el uso de marcadores de colores sobre las probetas a ensayar, estos marcadores deberán generar el mayor contraste posible para facilitar su segmentación en el procesamiento de imágenes. En la Figura 2.13 se muestran tres tipos de marcadores a utilizar (de izquierda a derecha): stickers color fucsia, marcador de metal color blanco y esmalte de uñas vinotinto colocado a 10 grados de inclinación. Fue considerada una espesura máxima de las marcas debido a las probables distorsiones de los marcadores durante el ensayo.



Figura 2.13 Ejemplos de marcadores en probetas metálicas (1 a 3) y plásticas (4).

Algoritmo de adquisición de imágenes

En la sección de apéndices de este documento se adjunta el código completo de captura de imágenes elaborado en Python usando la librería OpenCV. Respecto a la frecuencia de captura, esta depende de la velocidad del ensayo y del tipo de material testado, es útil pensar en las imágenes capturadas en función de la duración del ensayo. Por ejemplo, un ensayo de metales tiene una duración corta (aproximadamente 55

segundos) y las deformaciones son pequeñas por lo que sería conveniente capturar más imágenes por segundo (entorno de 15 cuadros/s es recomendado). Sin embargo, en plásticos donde el ensayo tiene mayor duración y la deformación es grande, es recomendado reducir la tasa de captura para un valor de 3 a 10 cuadros/s.

2.3.2 Etapa 2: Programa y algoritmos de preprocesamiento de imágenes y rectificación de imágenes

En el siguiente diagrama de flujo se muestra el proceso general que se sigue en los scripts del tipo macro del programa FIJI (ImageJ), para implementación de “Virtual Clip Gages” (VCG). En el programa FIJI se lleva a cabo el preprocesamiento de imágenes, además, cada sección del código (adjunto en los apéndices) incluye comentarios explicativos de la programación.

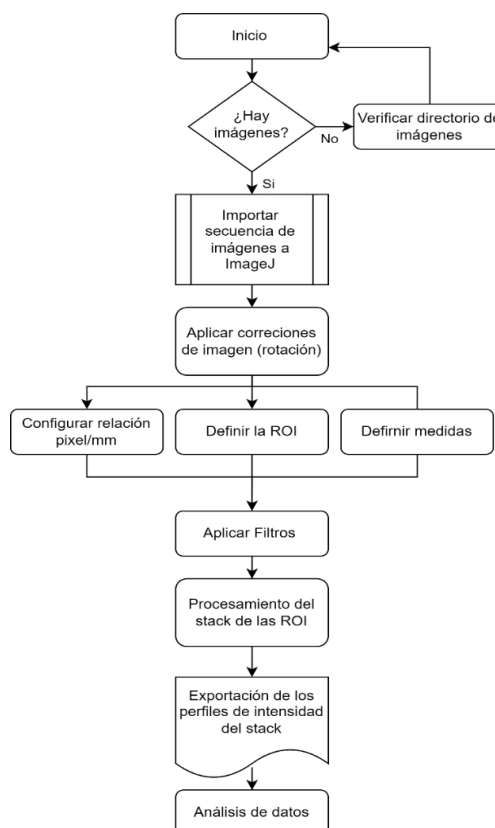


Figura 2.14 Flujograma de la programación del Virtual Clip Gage en MACROS para Fiji.

Importación de la secuencia de imágenes

Durante el ensayo de tracción, la cámara digital captura un conjunto de imágenes consecutivas que tendrá en este estudio el nombre de “stack”.

(i) Para procesar todo el stack de imágenes simultáneamente en FIJI, se selecciona “File” de la barra de menús y dando clic en “Import” aparece la opción “Image Sequence”. (ii) En la pantalla emergente aparecerá la casilla “Dir” que permitirá, dando clic en “Browse”, acceder a la carpeta en la que se encuentra el conjunto de imágenes a procesar.

Aplicar correcciones de imagen: Calibración y rectificación de imágenes

Para rectificar las imágenes capturadas, es considerada la aplicación del algoritmo para cámaras del tipo “*pin-hole*” propuesto por Zhang (2000). El objetivo principal de esta implementación es recuperar: (a) los parámetros intrínsecos de la captura, (b) los parámetros extrínsecos del dispositivo de captura, y (c) los coeficientes de distorsión de la captura digital. Posteriormente, empleando el modelo de Zhang, las imágenes son rectificadas minimizando las distorsiones y determinando la relación entre el tamaño de píxel y su correspondiente en unidades reales. El detalle de esta corrección se encuentra en los apéndices de este trabajo.

Preprocesamiento del paquete de imágenes

- **Configuración relación píxel/mm: Escalado de píxel para unidades reales.**

La calibración de un conjunto de imágenes en Fiji permite configurar la escala para que las distancias y áreas estén en las unidades deseadas (unidades del sistema internacional o sistema inglés) a partir de medidas en píxeles.

Para realizar la calibración es necesario conocer la medida real de alguna dimensión principal de la probeta testeada, por ejemplo, la distancia entre los marcadores. Con la herramienta “*Straight*” del *Toolbar* de *Fiji* se traza

una línea a lo ancho de la probeta y se selecciona “*Analyze*” del menú y finalmente “*Set Scale*”. En la pantalla emergente en la casilla de “*Distance in pixels*” se observan los píxeles asociados a la línea trazada y que se ingresan al algoritmo VCG.

- **Definición de la Región de Interés (ROI (Region of Interest))**

Lo que se pretende medir es la distancia relativa entre las marcaciones realizadas en las probetas ensayadas. Para esto, se define una región de interés (ROI) para reducir el dominio de trabajo para la aplicación de filtros, procesar o analizar de alguna manera. En el algoritmo se determinan dos regiones de interés, la primera reduce el dominio de la imagen exclusivamente a la región abarcada por la probeta a lo largo del ensayo y otra que sirve para la extracción de la posición de los perfiles de intensidad.

- **Aplicación de filtros digitales**

Una vez determinada la ROI, son aplicados algoritmos de preprocesamiento y segmentación al *stack*. Existen varias técnicas para este fin, en esta metodología se aplican principalmente dos filtros: filtro gaussiano y filtro de identificación de bordes. Dependiendo del material a ensayar se recomienda el uso de una u otra técnica de preprocesamiento.

Exportación de los perfiles de intensidad del paquete de imágenes

Las crestas y valles de los perfiles de intensidades de una imagen representan un cambio en la zona de la probeta. La identificación de estas zonas en todo el *stack*, permite rastrear el desplazamiento de esta a lo largo de la prueba realizada y determinar el movimiento relativo entre ellas. Esto es de particular interés ya que esta distancia relativa entre zonas será, finalmente, la deformación que sufre el material durante el ensayo.

Para el rastreo de los contornos se implementaron algoritmos de perfil en el lenguaje MACRO de Fiji (ImageJ) para obtener simultáneamente todos los mínimos del *stack*, una vez que los mínimos puntos de intensidad determinan la posición espacial de cada contorno, un flujograma del algoritmo se muestra en la Figura 2.15. Adicionalmente, el código junto a comentarios explicativos se facilita en la sección de apéndices de este

documento. Para utilizarlo, en la barra de menú del programa Fiji se selecciona “*Plugin*”, se despliega una ventana de opciones en la que se selecciona “*Macros*” y finalmente “*Run*”. En la pantalla emergente se busca y selecciona el script “*VCG.ijm*” y dar clic en “*open*”. Dentro de este script se incluye un segundo script llamado “*Stack Profiler*” y son ambos los que permiten concluir la Etapa 2.

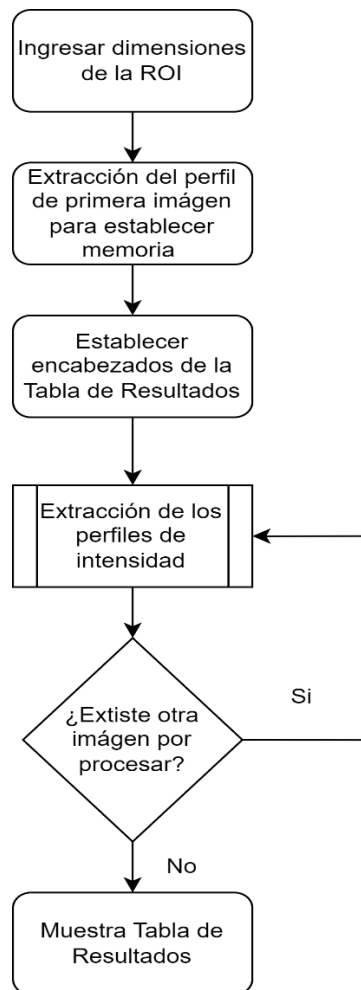


Figura 2.15 Flujograma del código de extracción de perfiles de intensidad en MACROS para FIJI.

2.3.3 Etapa 3: Programa de procesamiento de información y creación de curvas

Con ayuda de un código en Python para la extracción de máximos y mínimos locales (ver apéndices), se identifican los mínimos locales y se extrae finalmente la distancia relativa a estos puntos. Con ello se obtiene el

alargamiento y la deformación porcentual de la probeta testada. La Figura 2.16 muestra el flujograma del algoritmo empleado.

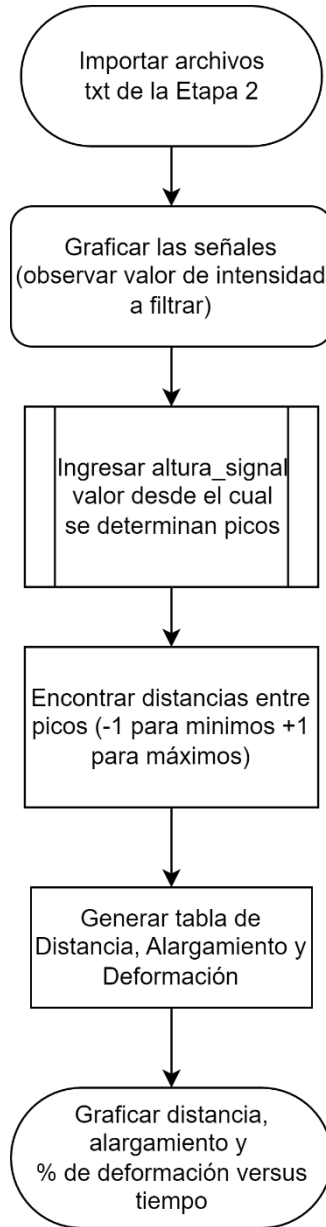


Figura 2.16 Flujograma de código en Python para creación de curvas.

CAPÍTULO 3

3. RESULTADOS Y ANÁLISIS

En este capítulo se describe la aplicación de la metodología descrita, para ejemplificar el uso de los algoritmos y programas que intervienen en la obtención de las curvas de resultados. Se ensayaron en total 4 probetas de plancha metálica y 2 probetas de tubería PVC cuyas dimensiones se mostraron en el capítulo anterior. Para determinar el porcentaje de error de los resultados y a su vez verificar el cumplimiento de las normativas para ensayos de probetas metálicas y de tuberías plásticas, los resultados registrados fueron comparados con los datos resultados provenientes del programa TRAPEZIUM de la máquina de ensayos SHIMADZU. Finalmente, se presentan los costos asociados a la metodología y su comparativa con accesorios comerciales.

3.1 Aplicación de la metodología en ensayos de tracción

Etapa 1: Proceso de captura de imágenes

Es fundamental comprender la importancia de la configuración del ensayo. Todos los materiales y equipos mencionados en el capítulo anterior fueron utilizados y configurados previo al ensayo a fin de obtener imágenes de calidad y facilitar el procesamiento de las imágenes capturadas. Esta configuración puede tomar tiempo al principio, sin embargo, una vez que se determinan las posiciones correctas de los equipos, se podrán llevar a cabo tantos ensayos como se deseen. Se mencionan entonces los pasos que se llevaron a cabo previo a al inicio de los ensayos.

1. Medición de la medida de referencia

Esta medida de referencia se tomó previamente a la ejecución de los ensayos. Si no se ha tomado esta medida y se realizó el ensayo, entonces las imágenes capturadas no tienen validez para la determinación del alargamiento de la probeta, y solo podrán ser procesadas para determinar las deformaciones ya que las mismas son relativas al desvío porcentual de la distancia entre los marcadores y por lo tanto independientes de la unidad de medida. Es fundamental utilizar un calibrador de vernier o una regla metálica de precisión y

obtener esta medida como se muestra en la Figura 3.1, donde se muestra que, para uno de los ensayos la medida de referencia fue de 40.05 mm.



Figura 3.1 Toma de medida de referencia en probeta metálica.

2. Colocación del sensor (cámara web)

Como se trató de metales y la deformación esperada es pequeña, convenía colocar el sensor de medición lo más cercano posible a la probeta, tomando en consideración el desplazamiento máximo al que se iba a llegar en el ensayo. De esta manera, la cámara puede captar el movimiento completo de los marcadores durante el ensayo hasta la ruptura de la probeta. En la Figura 3.2 se muestra el sensor ya colocado; es importante resaltar que la cámara se encuentra de forma vertical para incrementar el campo de visión capturado, una vez que la proporción del fotograma 3x4, lo que permitió mantener un rango de medición amplio.



Figura 3.2 Colocación del sensor en la máquina de ensayos.

En la Figura 3.3 se muestran las dimensiones de las imágenes a capturar con esta configuración de la cámara. Se puede tomar esta imagen como referencia de lo que debe ver el sensor para todos los ensayos de materiales con poca elongación (menor al 20% como los metales).



Figura 3.3 Referencia de las imágenes capturadas.

3. Mejoramiento de la imagen y eliminación de brillo

Se requirió generar contraste entre la probeta y marcadores, así como con el fondo. Para ello se utilizó una tela verde para generar un fondo uniforme y de fácil segmentación en el procesamiento. El tono de verde sigue la metodología del efecto de pantalla verde, que permite eliminar el color en caso de seleccionar uno u otro tipo de procesamiento de imagen. Finalmente, en la Figura 3.3 se observa una zona de brillo encerrada por un círculo rojo. Este brillo se produjo por la iluminación del laboratorio ya que una luz blanca se encontraba presente sobre la máquina de ensayos. Para eliminarlo se utilizó un difusor de luz colocado de modo que la imagen no presentase más ese brillo quedando colocado como se muestra en la Figura 3.4. Se muestra finalmente la configuración utilizada en el ensayo en la Figura 3.5.



Figura 3.4 Colocación del difusor de luz.



Figura 3.5 Configuración para ensayos de metales



Figura 3.6 Configuración para ensayos de plásticos.

Nótese en la Figura 3.6 que la configuración cambió. Se coloca tela en las mordazas, la luz se ubica de forma diferente y la cámara se encuentra un poco más alejada. Esto se realizó debido a que las deformaciones en plásticos típicamente son mayores que en metales, por lo que, si se colocase la cámara demasiado cerca, en algún instante del ensayo dejará de observar alguna de las marcaciones realizadas. La luz también varía ya que los plásticos no reflejan la luz como los metales y el problema del brillo en la probeta disminuye.

4. Inicio del ensayo y captura con OpenCV.

Se utilizó Visual Studio Code para correr el algoritmo de captura en Python que se muestra en la Figura 3.6. La única variable por editar en el código previo al inicio del ensayo es la tasa de muestreo que, en estos ensayos se utilizó 15 cuadros por segundo. Para terminar el ensayo se presiona la tecla “q” (de quit que significa salir). Se inició entonces la grabación primero y luego se inició la carga en el equipo de ensayos universales.

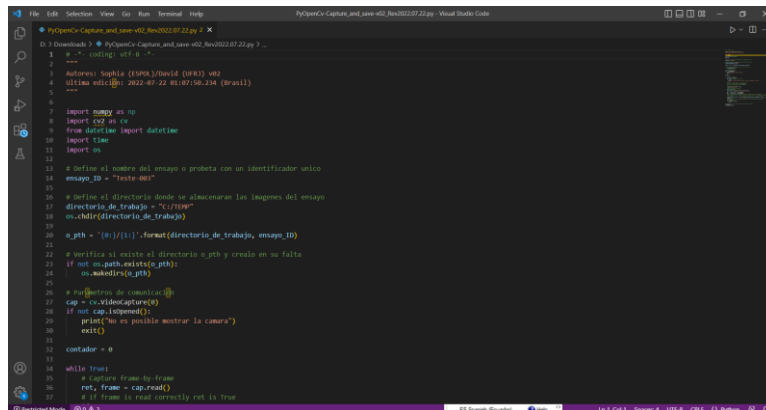


Figura 3.5 Algoritmo de captura (OpenCV)

```

62 # Use la siguiente línea si es requerido condicionar una tasa de grabación mas lenta/rápida
63 time.sleep(15)
64 # =====
65 if cv.waitKey(1) == ord('q'):
66     break
67
68 # Cuando todo está listo, liberar cámara y cerrar todas las ventanas
69 cap.release()
70 cv.destroyAllWindows()

```

Figura 3.6 Sección del código a editar dependiendo del ensayo.

Etaapa 2: Programa de preprocesamiento de imágenes.

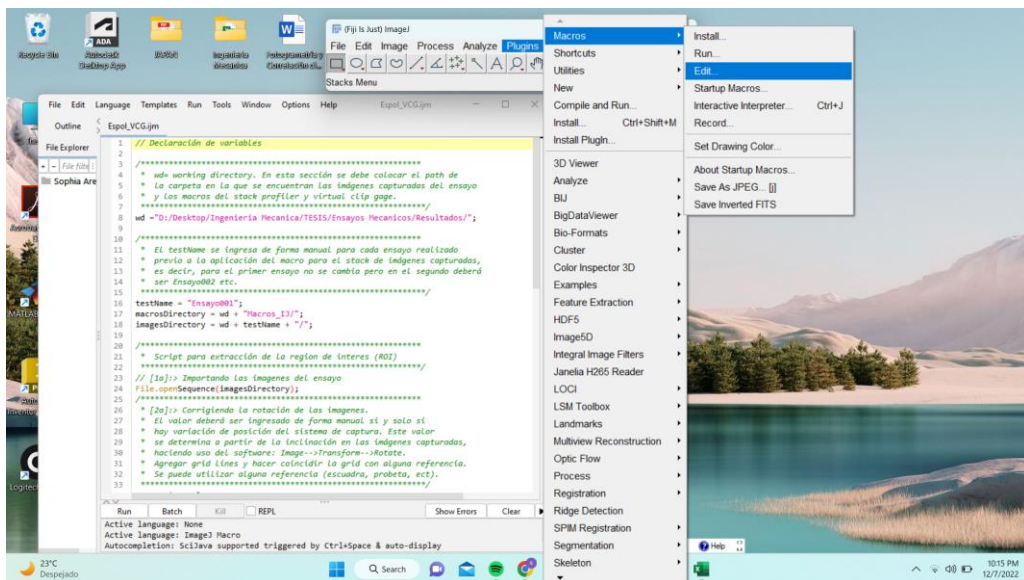


Figura 3.7 Código en MACROS para Fiji VCG.

En la Figura 3.8 se muestra el código en Macros para Fiji y los pasos para editarlo e ingresar las variables. La primera variable que se ingresó se muestra en la Figura 3.1 que es la variable “mmDistance” a ingresar en el VCG en cada ensayo y tomada previo al mismo. La medida de referencia se toma en función de los datos a obtener,

como este ensayo es de tracción y se pretende medir desplazamiento en el eje “x”, la medida de referencia es la distancia entre marcadores. Si se quisiera medir el encuellamiento entonces la medida de referencia podría ser el ancho de la probeta. Para la obtención de la variable pixelsDistance se importó la primera imagen y se realizó una línea como se muestra en la Figura 3.9 donde se obtiene la distancia en milímetros real de los puntos de referencia escalada a pixeles.

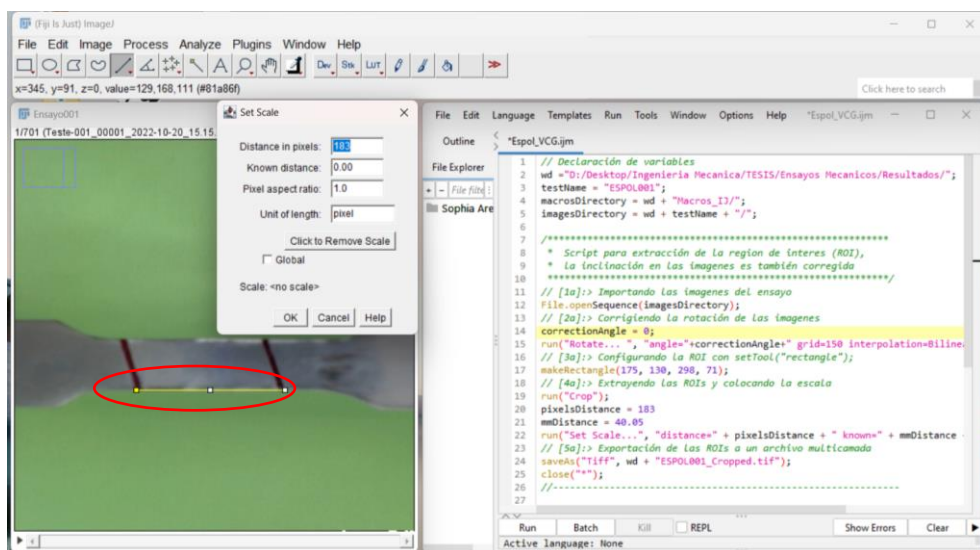


Figura 3.8 Ingreso de datos en el VCG.

Luego se determinaron las dimensiones de las dos regiones de interés que se colocan en la sección 3a y 2b del VCG. La creación de una región de interés reduce el tiempo de procesamiento y uso de memoria computacional. Esta región se creó importando la última imagen obtenida y seleccionando la herramienta “Rectangle” del *Toolbar* de Fiji y encerrando con esta herramienta la zona que se desea procesar, puede ser la zona constante de la probeta como se observa en la Figura 3.10.

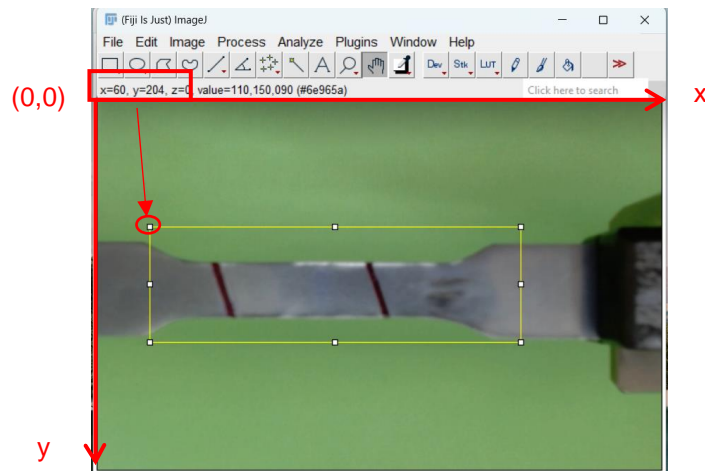


Figura 3.9 ROI para sección 3a del VCG.

Se extrajo la siguiente información del rectángulo: coordenadas “X” y “Y” de la esquina superior izquierda de la selección, el ancho y el alto; el eje de referencia se observa también en la Figura 3.10. Esta información se ingresó en el punto 3a del script VCG como se muestra en la Figura 3.11 siendo (x,y,ancho, alto).

```

16 // [3a]:> Configurando la ROI con setTool("rectangle");
17 makeRectangle(125, 269, 247, 17);
18 // [4a]:> Extrayendo las ROIs y colocando la escala

```

Figura 3.10 Variables a ingresar de la ROI.

Se realizó el mismo proceso anterior para una última región de interés, esta vez más pequeña y que se ingresa en el punto 3b del script VCG.

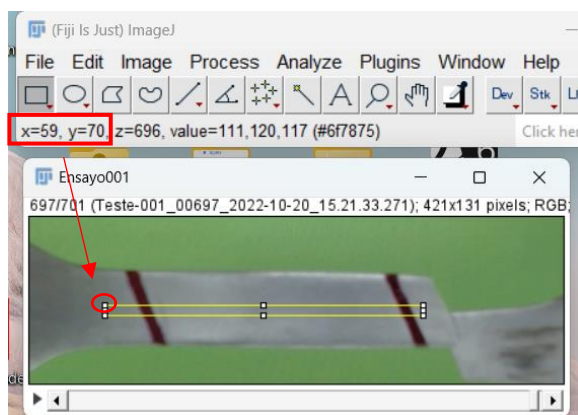


Figura 3.11 ROI a ingresar en punto 3b del código.

Finalmente, se aplicó el primer algoritmo llamado VCG de Fiji. En la Figura 3.13 se muestran los pasos para correr el algoritmo y en la Figura 3.14 los resultados obtenidos.

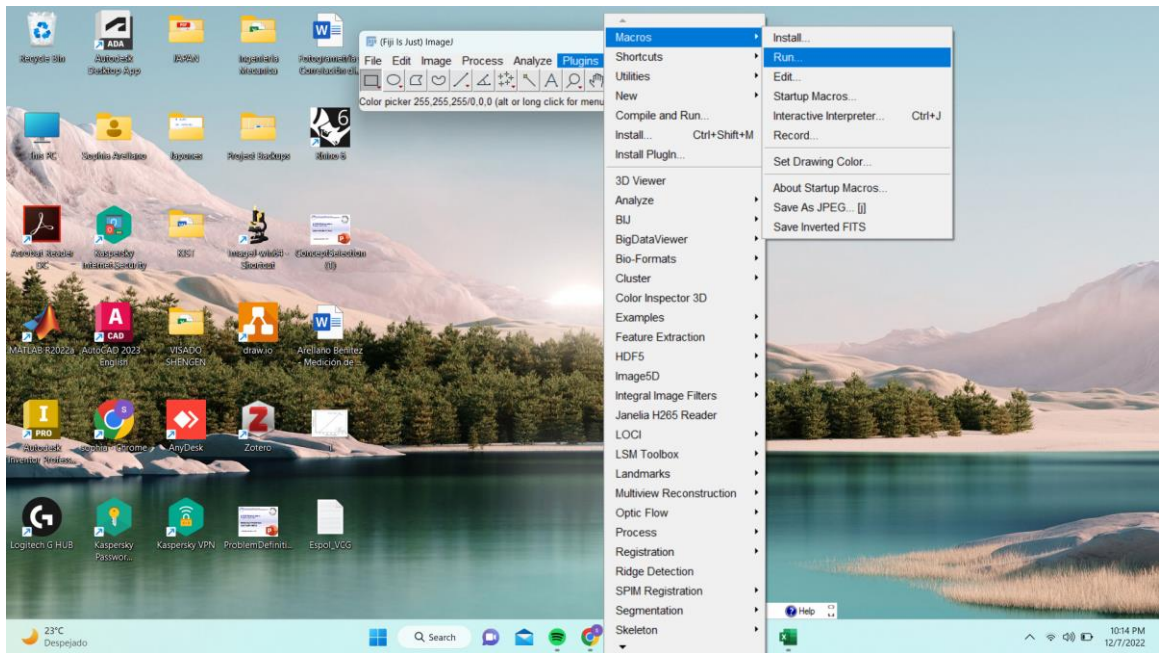


Figura 3.12 Pasos para correr el algoritmo VCG en Fiji.

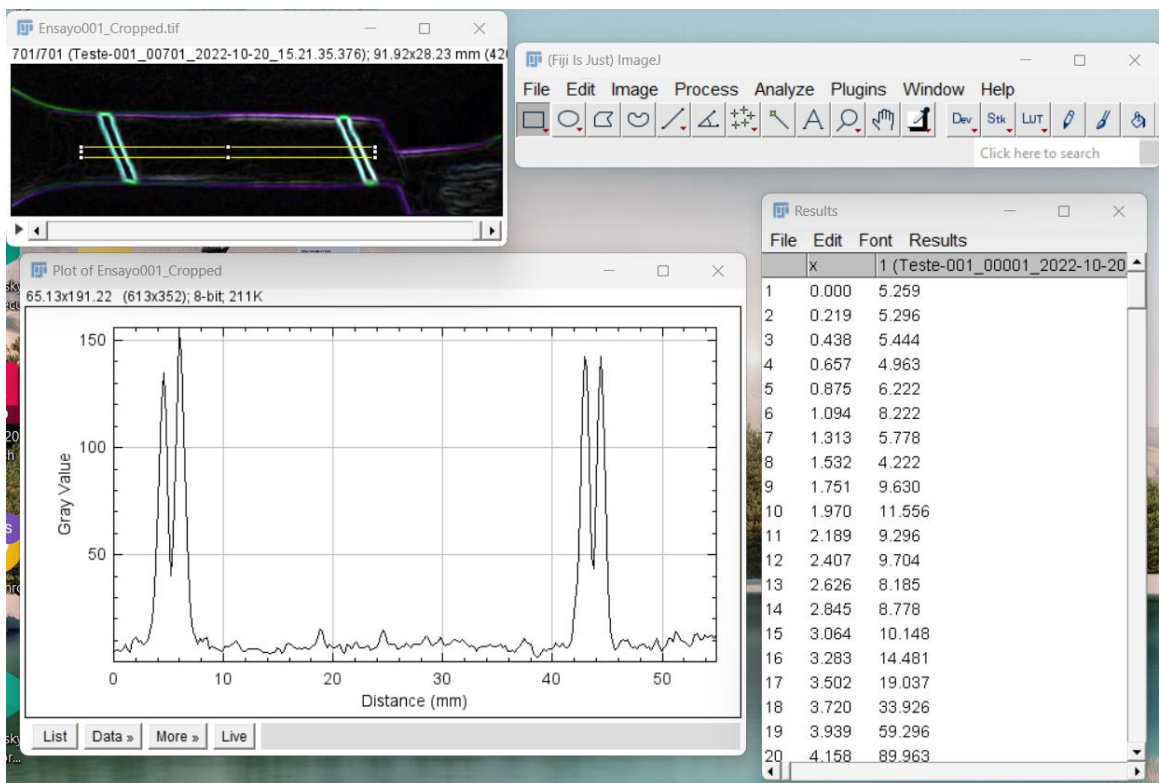


Figura 3.13 Resultados del VCG, final del preprocesamiento de la imagen.

Etapa 3: Generación de curvas deformación versus tiempo.

Finalmente, se utilizó el ultimo código llamado “Análisis de Datos” en lenguaje Python. Para abrir el archivo se usa la ventana de comando de Windows (Command Prompt app) como se muestra en la Figura 3.15 y se escribe Jupyter notebook.

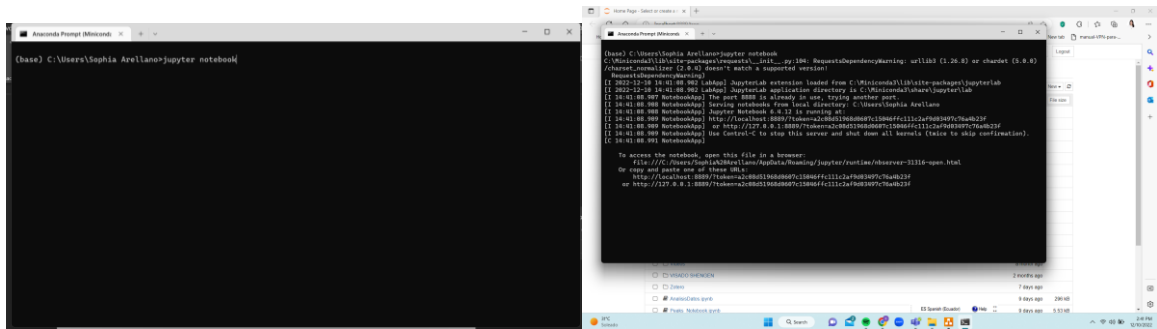


Figura 3.14 Command Prompt para abrir el notebook de Python.

Se desplegó entonces en el navegador una ventana y en ella se selecciona el archivo “Análisis Datos” como se muestra en la Figura 3.16.

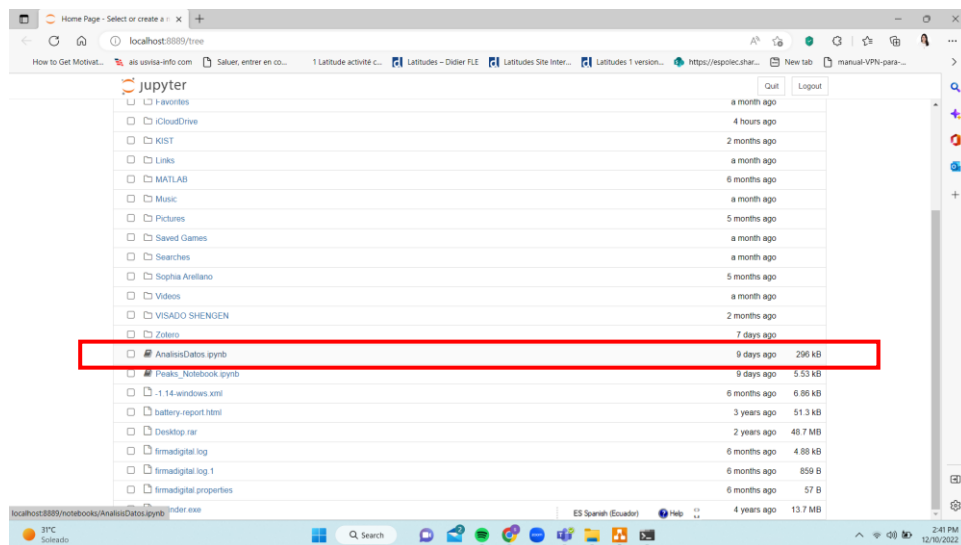


Figura 3.15 Ventana del navegador con Jupyter abierto.

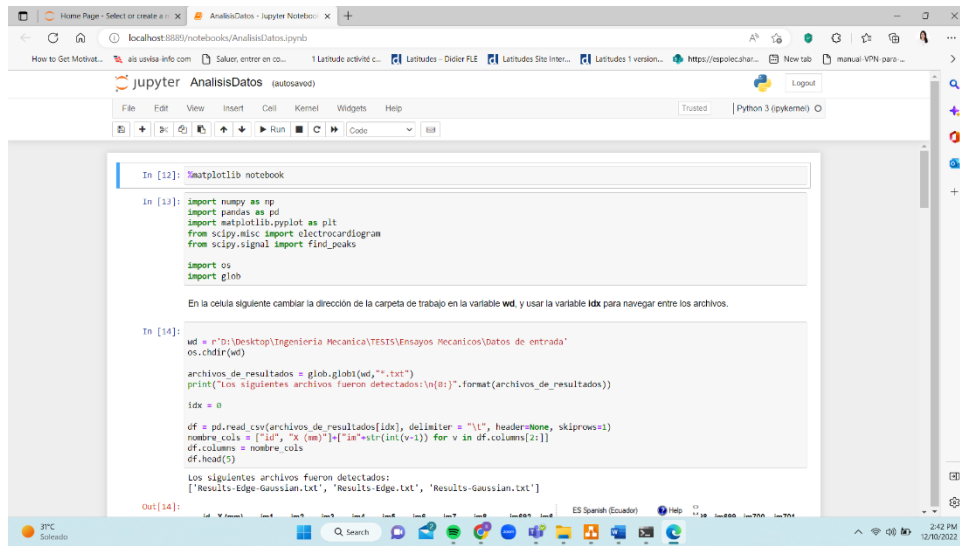


Figura 3.16 Notebook de generación de curvas de deformación.

Se dio clic en el botón “Cell” y en “Run Cells” como se muestra en la Figura 3.18 y, en la misma ventana al final, se muestran todas las curvas mencionadas en el capítulo 2.

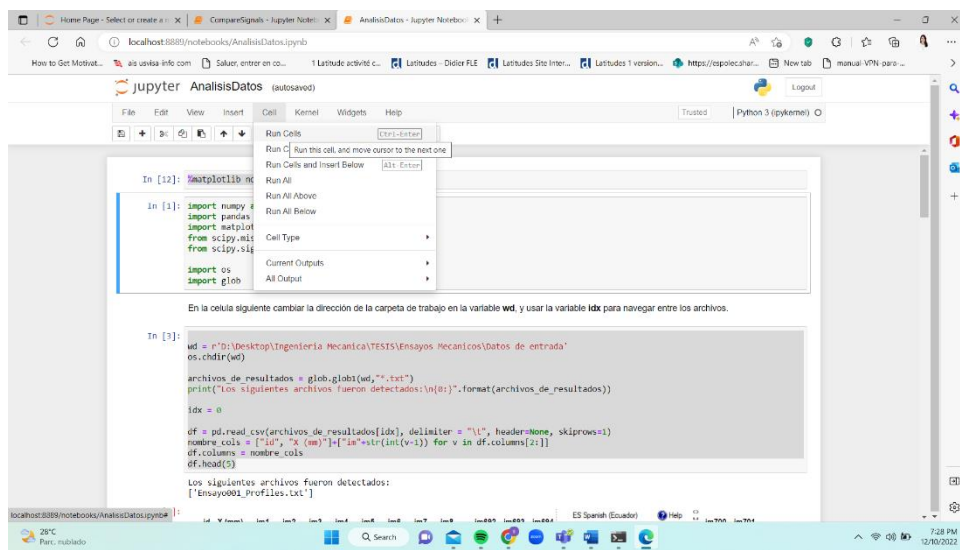


Figura 3.17 Corrido del programa de obtención de curvas.

Distancia versus Tiempo, Alargamiento versus Tiempo y Porcentaje de Deformación versus Tiempo fueron los resultados obtenidos y se muestran en la Figura 3.19.

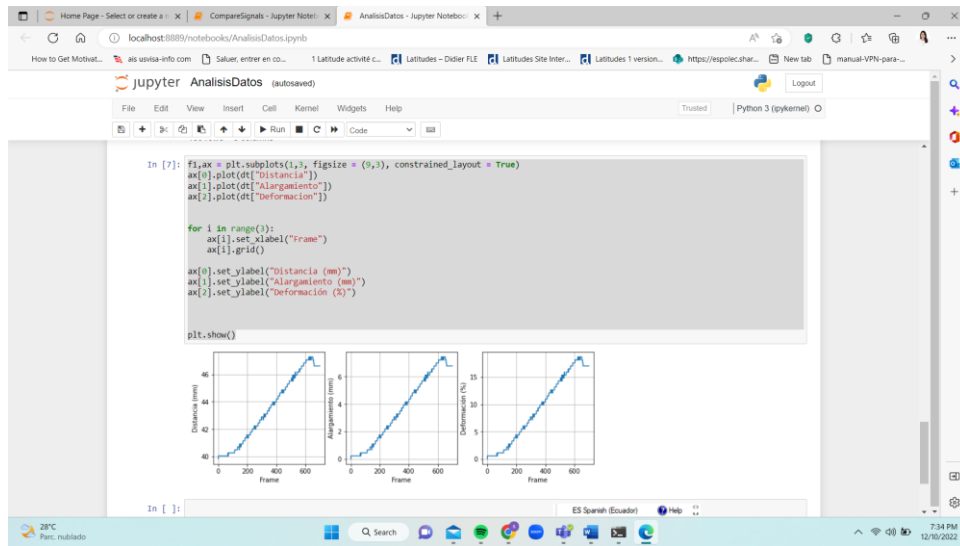


Figura 3.18 Resultados del código Análisis de datos.

3.2 Resultados de la metodología

Se ensayaron 4 probetas de chapa de acero siguiendo la norma ASTM E8:2021 a una velocidad del ensayo de 10 MPa/s. Las dimensiones de la probeta son: 0.23 mm de espesor y 12.7 mm de ancho en la zona paralela constante. La frecuencia de muestreo fue variada entre ensayos para observar el comportamiento de la curva y analizar resultados. Los resultados se muestran desde la Figura 3.19 hasta la Figura 3.22.

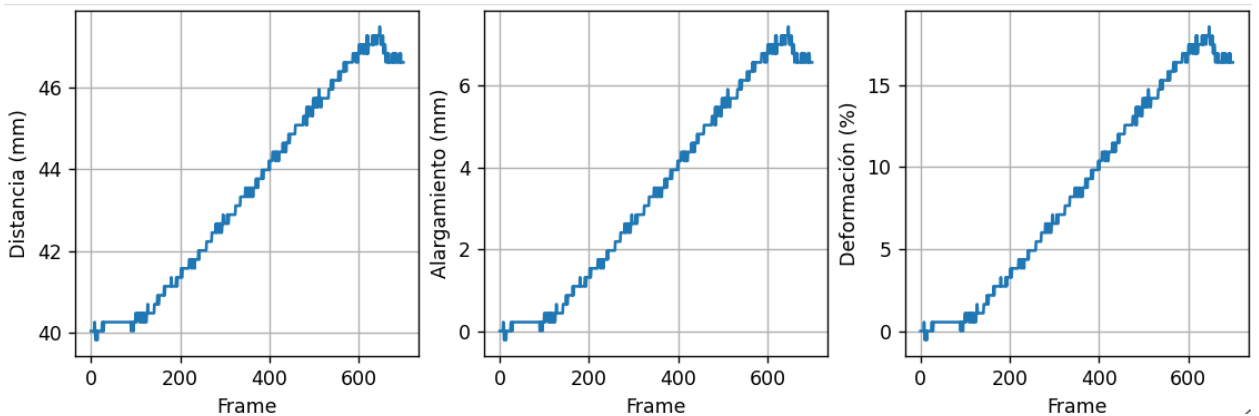


Figura 3.19 Ensayo #1: Probeta de lámina de acero tipo MR de 0.2 mm de espesor con una frecuencia de captura de 2 Hz (5 imágenes por segundo).

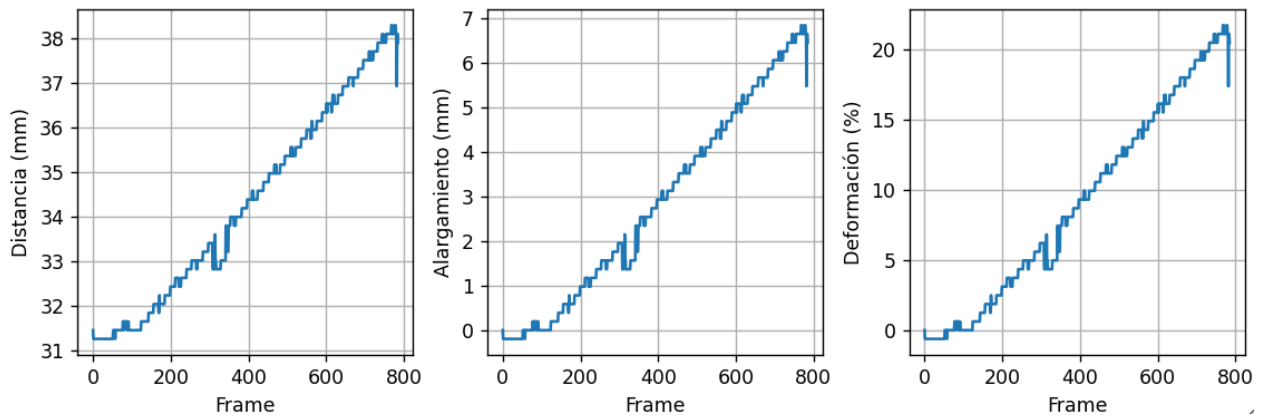


Figura 3.20 Ensayo #2: Probeta de lámina de acero tipo MR de 0.2 mm de espesor con una frecuencia de captura de 2 Hz (5 imágenes por segundo).

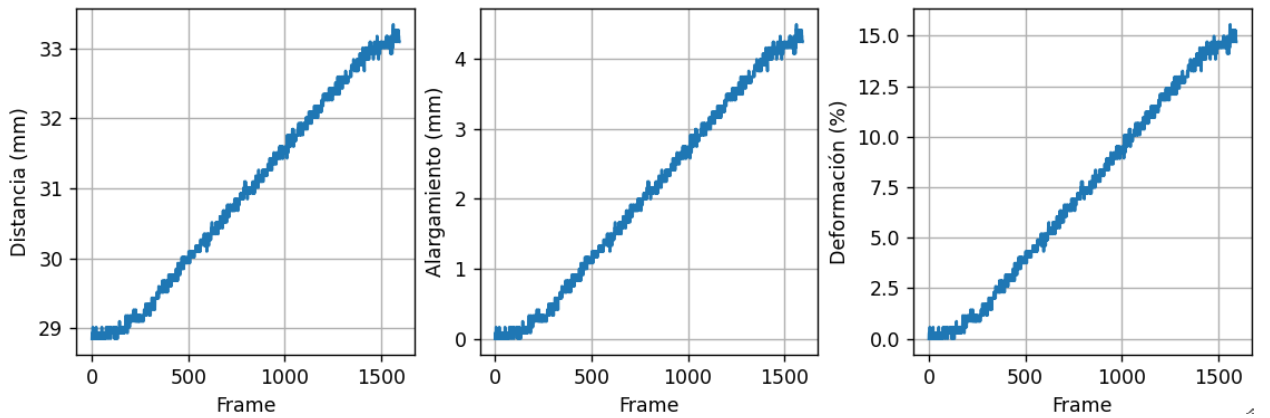


Figura 3.21 Ensayo #3: Probeta de lámina de acero tipo MR de 0.2 mm de espesor con una frecuencia de captura de 5 Hz (10 imágenes por segundo).

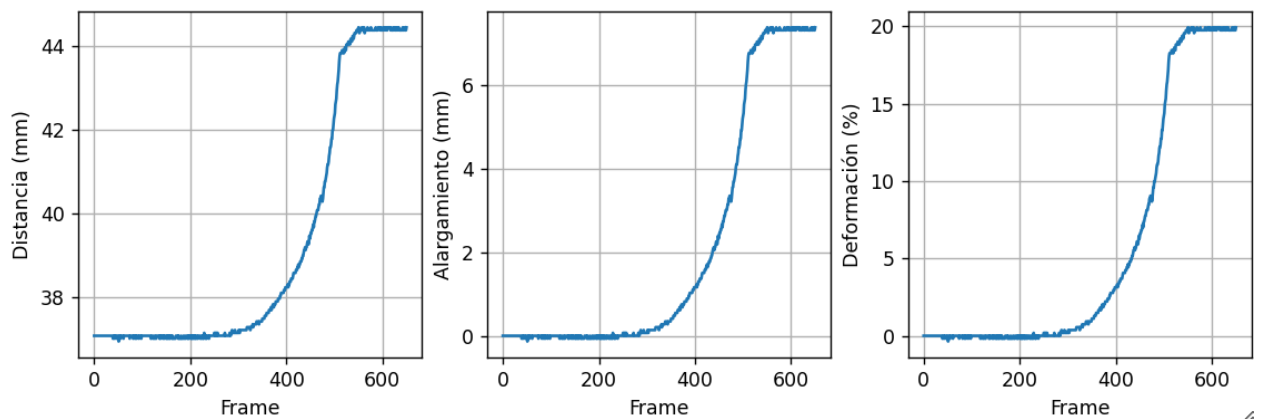


Figura 3.22 Ensayo #4: Probeta de lámina de acero tipo MR de 0.2 mm de espesor una frecuencia de captura de 14.28 Hz (15 imágenes por segundo).

También, se ensayaron 2 probetas plásticas de tubo de polietileno siguiendo la norma ISO 6259 con una velocidad de ensayo de 100 mm/min. Las dimensiones

de la probeta son: 3.1 mm de espesor y 6.105 mm de ancho en la zona paralela constante. Los resultados se muestran en las Figuras 3.23 y Figura 3.24. En estos ensayos la tasa de captura se mantuvo constante.

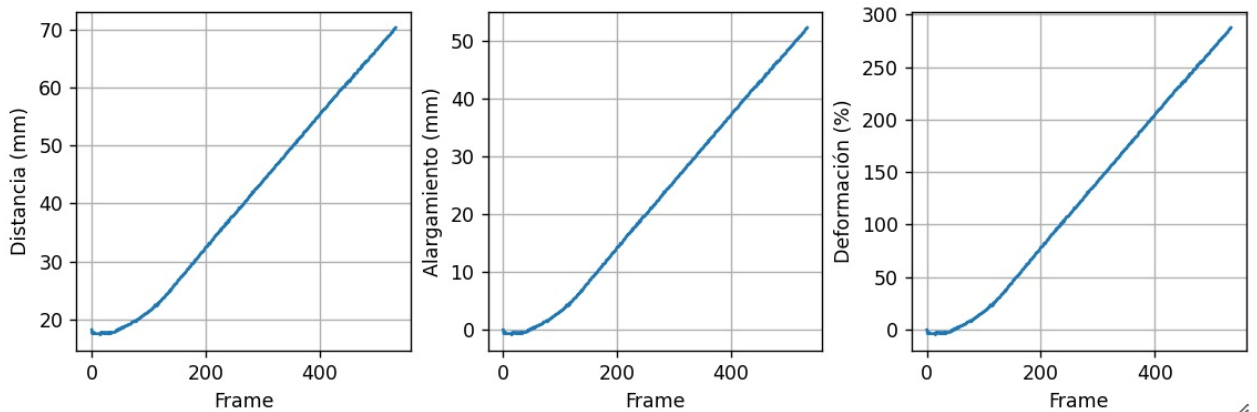


Figura 3.23 Ensayo #5: Probeta de tubo de polietileno PE 100 de espesor 3.073 mm y a una frecuencia de captura de 14.28 Hz (15 imágenes por segundo).

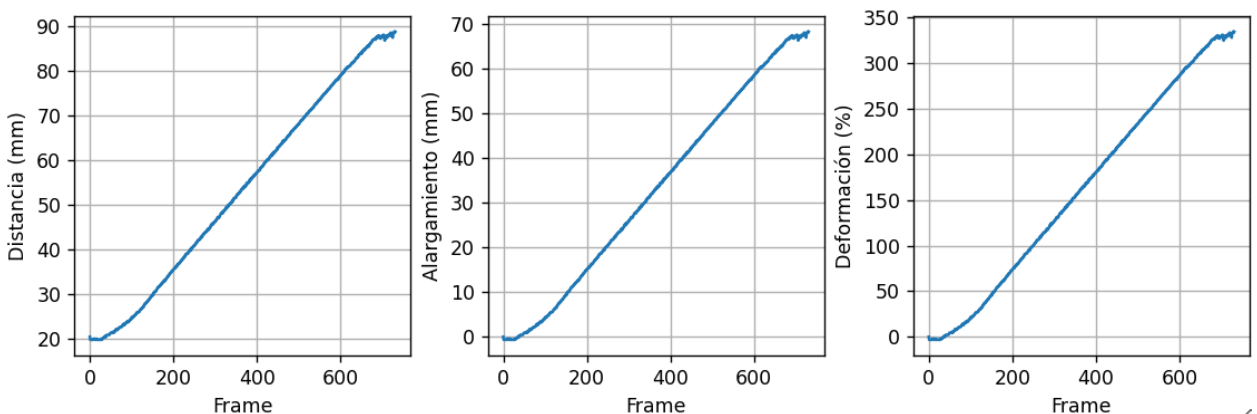


Figura 3.24 Ensayo #6: Probeta de tubo de polietileno PE 100 de espesor 3.073 mm y a una frecuencia de captura de 7.14 Hz (7.5 imágenes por segundo).

3.3 Resumen de resultados

Debido a factores externos como variaciones en la iluminación local, ruidos en el procesamiento de señal pueden ser registrados en el procesamiento de los perfiles, para disminuir los efectos del ruido de señal (SNR), se implementó el filtro Savitzky-Golay que ajusta la señal de interés a través de un proceso iterativo por mínimos cuadrados, esto permitió conservar las características de la distribución inicial.

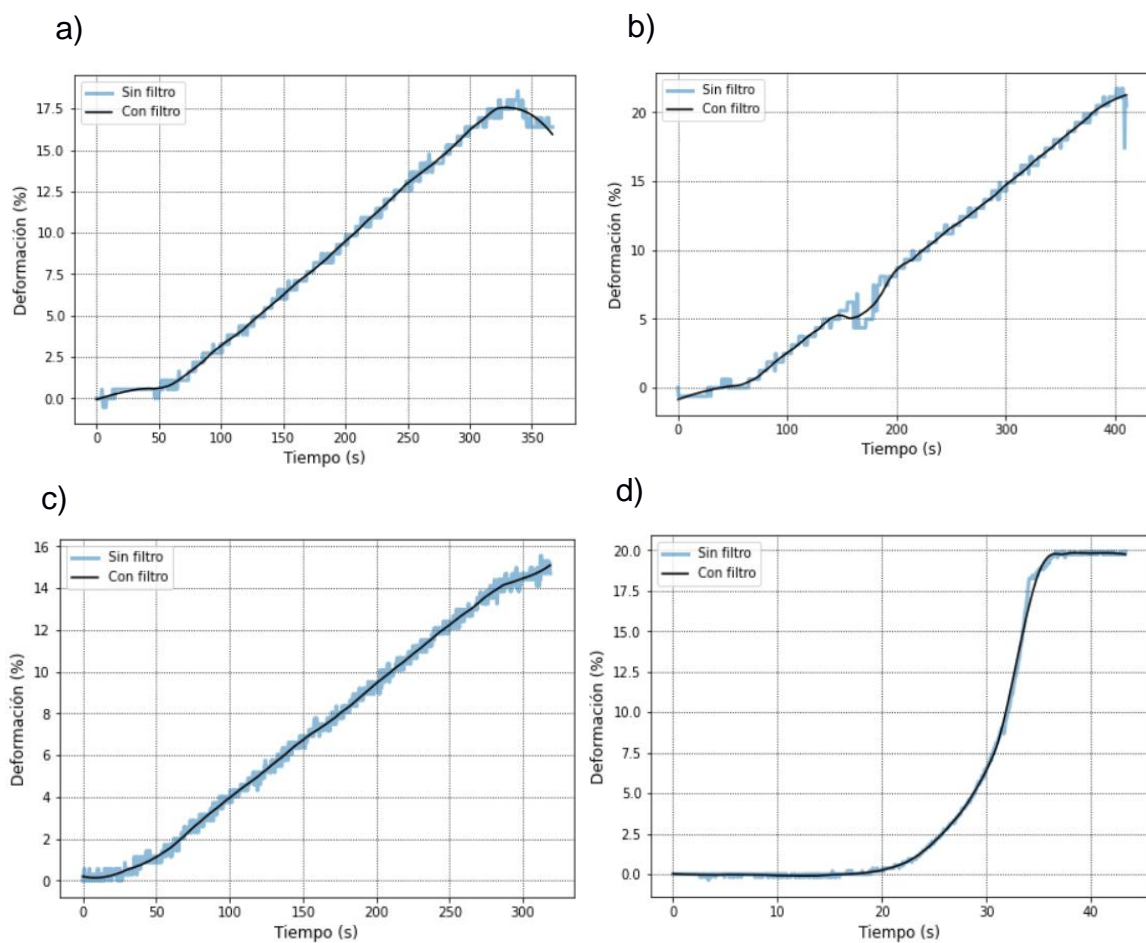


Figura 3.25 Resumen de resultados de ensayos metálicos con aplicación de filtro Savitzky-Golay. Los a) y b) corresponden a los ensayos a frecuencia de 2 Hz, el c) a una tasa de 5 Hz y finalmente el d) a 14.28 Hz.

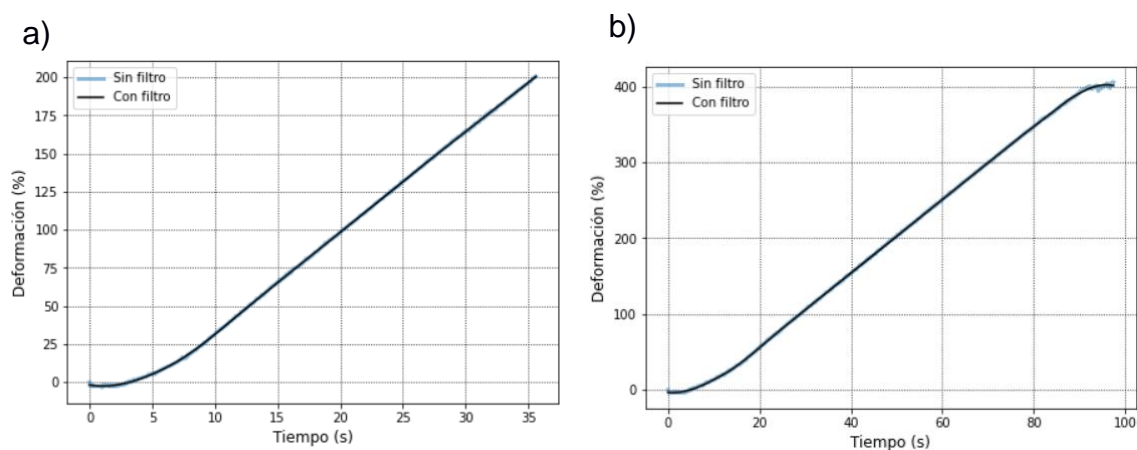


Figura 3.26 Resumen de resultados plásticos con aplicación de filtro Savitzky-Golay. Ambos a una frecuencia de muestreo de 15 Hz.

3.4 Validación de resultados: Comparación de curvas de Esfuerzo vs Deformación en metales y plásticos

Para validar los resultados adquiridos a través de las imágenes, se escribió otro código en Python para la asociación de resultados de deformación unitaria obtenidos con el equipo de ensayos universales y la metodología presentada en este documento. Los resultados de todos los ensayos de metales se muestran en la Figura 3.27.

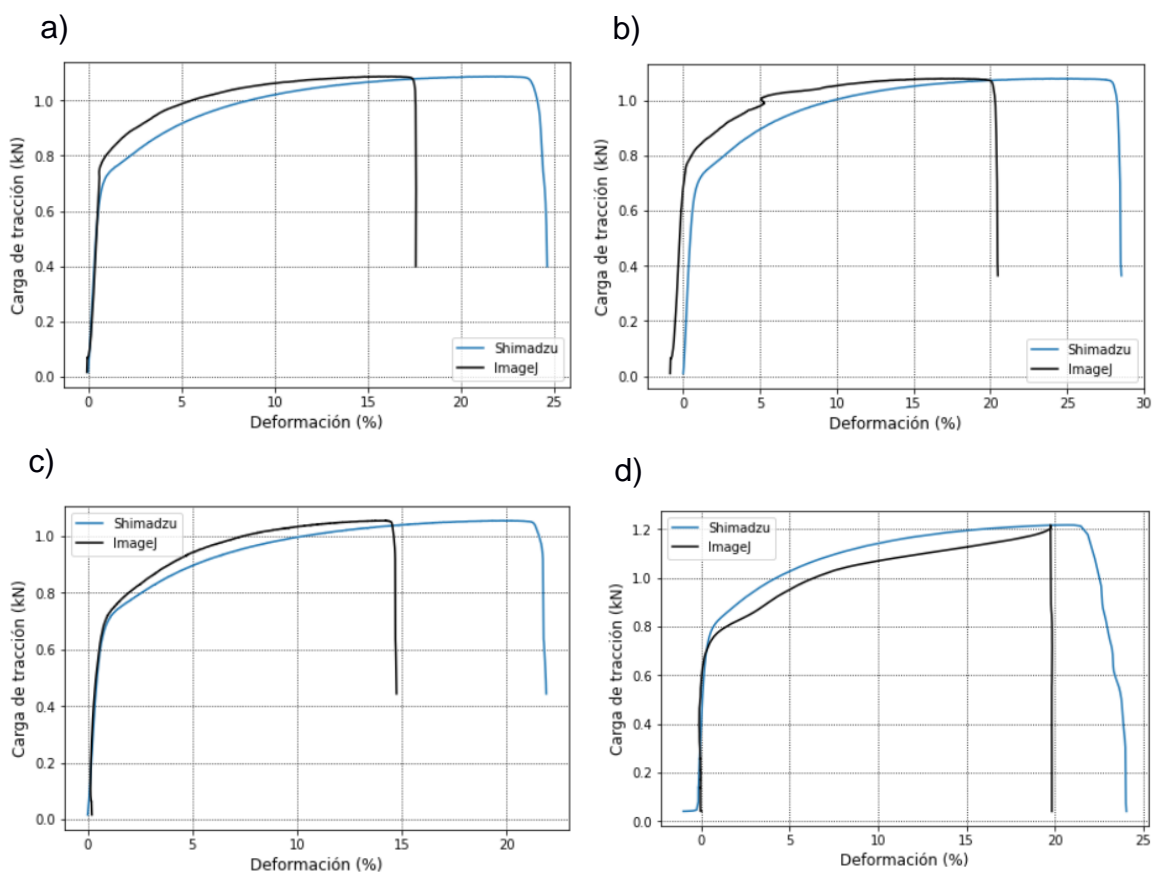


Figura 3.27 Comparación de resultados de ensayos metálicos para todas las tazas de muestreo en función del porcentaje de deformación.

Para las probetas plásticas se incluyó una gráfica de la carga en función del alargamiento. Ambas se muestran en la Figura 3.28.

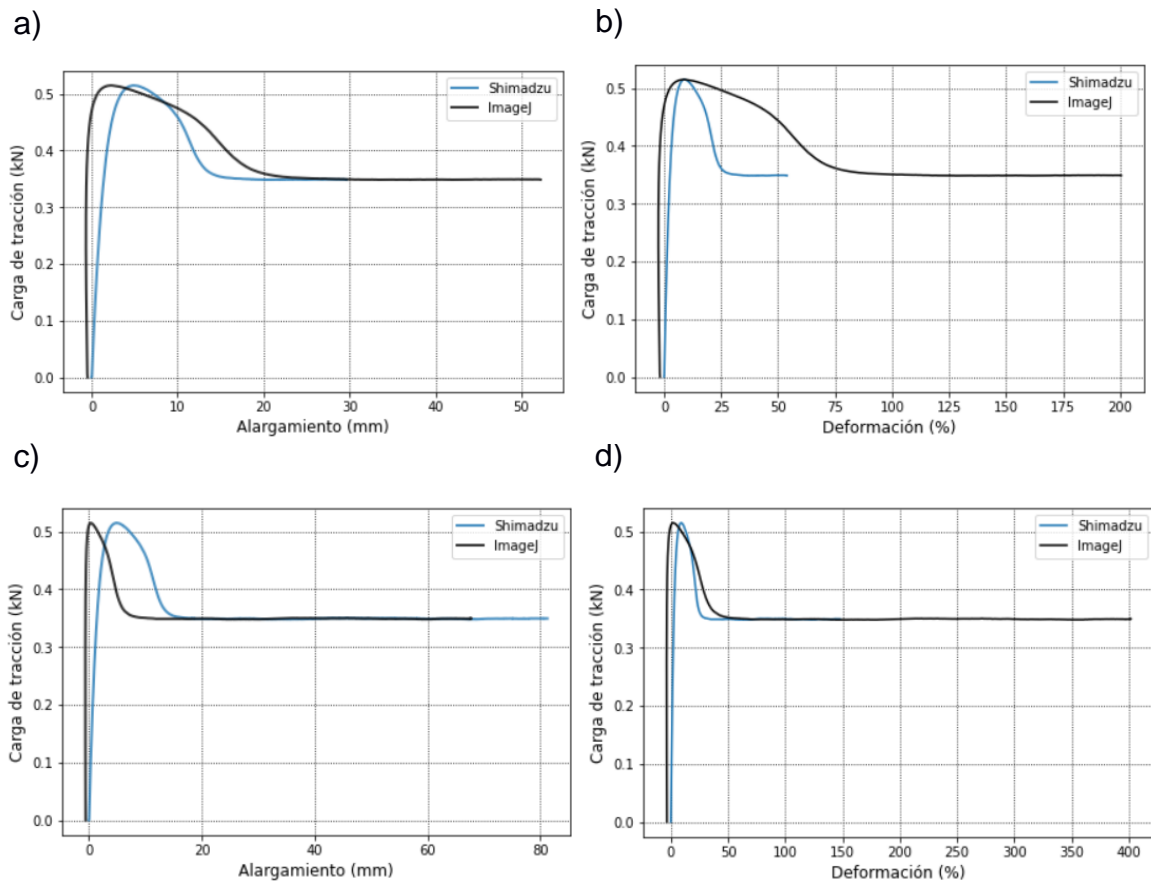


Figura 3.28 Comparación de resultados de ensayos plásticos en función del alargamiento y del porcentaje de deformación.

Se incluyó también la comparación de deformación porcentual en función del tiempo para todos los ensayos realizados, así como una diferencia porcentual entre los datos del equipo de ensayos universales. Para los ensayos plásticos se realizó la curva de alargamiento versus tiempo. Todas estas gráficas se presentan desde la Figura 3.29 hasta la Figura 3.34.

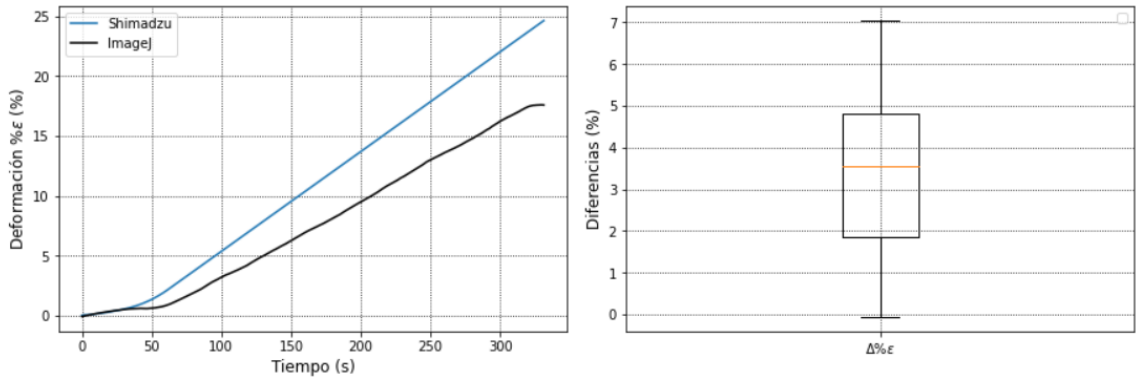


Figura 3.29 Porcentaje de deformación versus tiempo y diferencia porcentual de ensayo metálico a 2 Hz

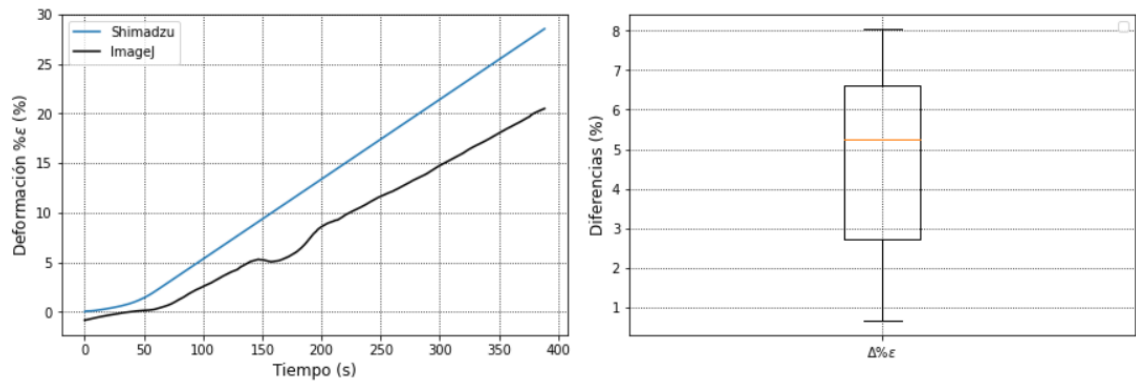


Figura 3.30 Porcentaje de deformación versus tiempo y diferencia porcentual de ensayo metálico a 2 Hz

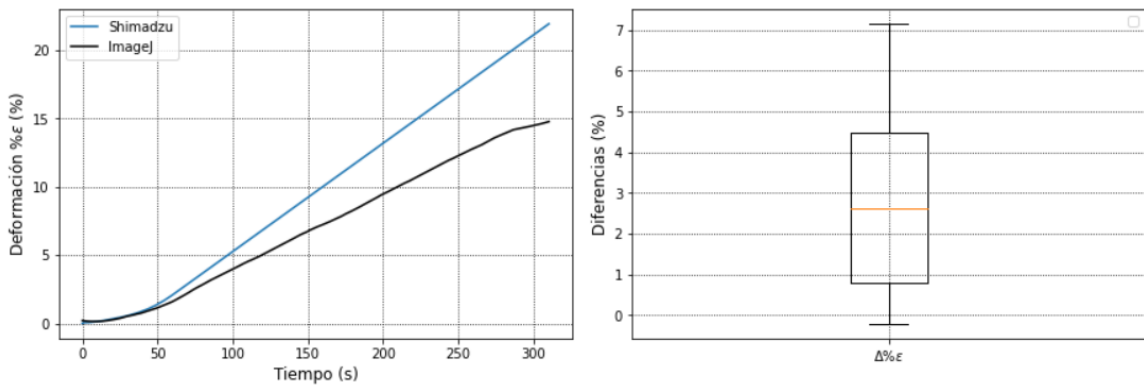


Figura 3.31 Porcentaje de deformación versus tiempo y diferencia porcentual de ensayo metálico a 5 Hz.

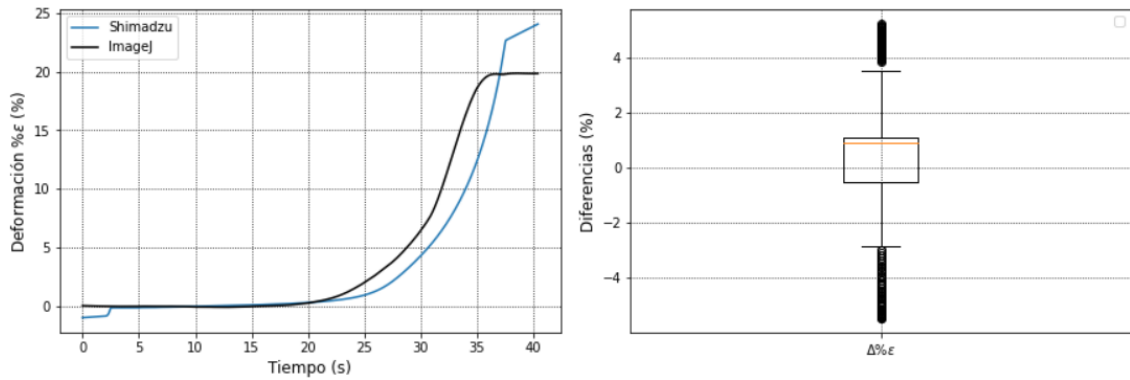


Figura 3.32 Porcentaje de deformación versus tiempo y diferencia porcentual de ensayo metálico a 14.28 Hz.

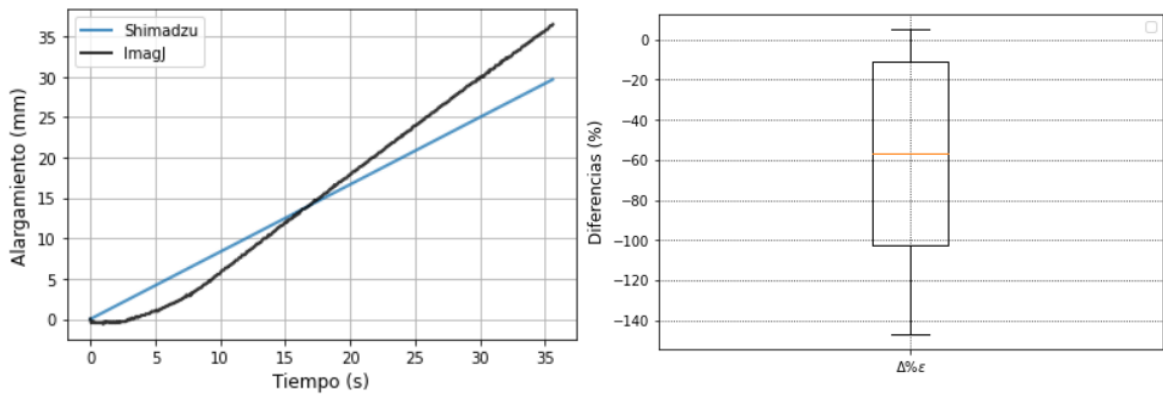


Figura 3.33 Alargamiento versus tiempo y diferencia porcentual de ensayo plástico a 14.28 Hz.

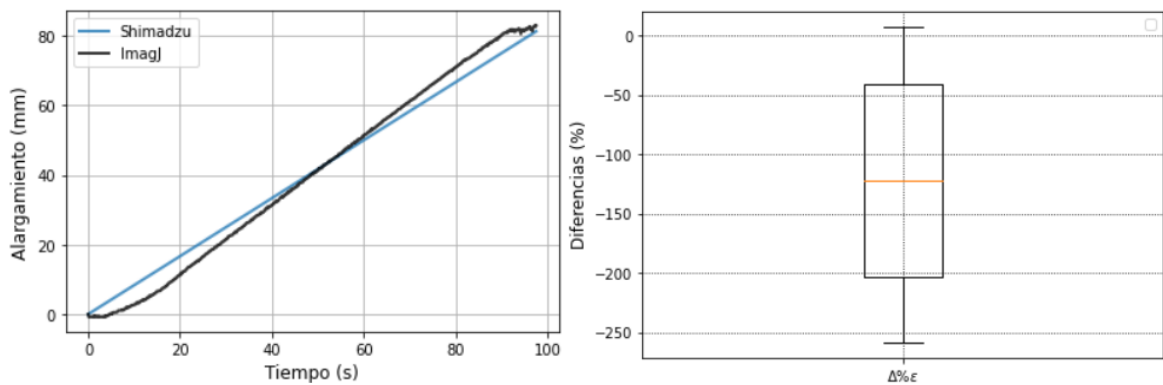












Figura 3.34 Alargamiento versus tiempo y diferencia porcentual de ensayo plástico a 14.28 Hz.

3.5 Costos asociados al proyecto

Se evaluaron los costos asociados a la metodología propuesta tanto de los equipos y los consumibles, estas se presentan en la Tabla 3.1.

Tabla 3.1 Costeo de la metodología.

Equipo	Imagen	Costo und.	Cantidad	Total
La lámpara LED (tipo O-Ring) de mínimo 2500 lúmenes.		\$20.00	1	\$20
Cámara web Logitech modelo HD Pro C920 con conexión USB de resolución de hasta 1920x1080 píxeles y frecuencia de ~25 Hz.		\$69.99	1	\$70
Trípode Amazon Basics		\$14.69	1	\$15
Un vernier mecánico o digital.		\$29.99	1	\$30
Tela para contraste de imágenes 120 x 80 cm.		\$5.00	1	\$5
Difusor de luz de 30 x 30 cm.		\$14.99	1	\$15
PC de 8 Gb de memoria RAM y 200 Gb en disco		\$800	1	\$800
Consumibles	Imagen	Costo unitario	Cantidad	Total
Marcador para metal		\$4.50	1	\$5
Stickers redondos de colores fluorescentes		\$3.00	1	\$3
Esmalte de uñas color rojo		\$ 5.00	1	\$5
			Total	\$1067.00

Una vez se tuvieron los costos de la metodología, se compararon con accesorios disponibles en el mercado mencionados en el capítulo 1 y se evaluó el porcentaje de diferencia entre costos.

Tabla 3.2 Comparación de costos con accesorios del mercado.

Accesorio	Marca	Rango	Costo	Comparación de precios
Video extensómetro	Jinan Hensgrand Instrument	2-2000mm	\$40,000.00	9733%
Extensómetro clip-on	Shimadzu	1-50 mm	\$ 7,000.00	8475%

3.6 Análisis de resultados

Se realizó entonces la metodología para un sistema de adquisición de imágenes haciendo uso de una cámara web y programas de uso libre. Se probó la eficacia del sistema de medición realizando 6 ensayos de tracción, 4 en probetas de chapa metálica y 2 en tubo de polietileno de alta densidad siguiendo las normativas requeridas. Se obtuvieron como resultados las curvas de Esfuerzo vs Deformación características de cada material.

A fin de no perder datos antes o después del ensayo, se inicia la captura unos minutos previos a la inicialización del ensayo y se sigue capturando un poco después de haber culminado la prueba, esto genera datos extra al inicio y al final mostrándolos como valores constantes de deformación que se muestran en la sección 3.2 especialmente en la Figura 3.22.

En la sección 3.2 se mostraron las gráficas que representan la distancia, alargamiento y porcentaje de deformación unitaria de la probeta en la zona calibrada para distintas tasas de muestreo. Las dos primeras gráficas (Figura 3.19 y Figura 3.20) con una tasa de captura de 5 imágenes por segundo presentan un comportamiento escalonado muy marcado. Esto se considera ruido en la medición ocasionado mayormente por el brillo y la iluminación del ensayo y, para mitigarlo, se aplican filtros. En los ensayos 3 y 4 de metales, el ruido de la medición ha disminuido, esto se debe en gran parte al aumento en la tasa de muestreo (10 y 15 imágenes por segundo respectivamente), que permiten capturar deformaciones

pequeñas con mayor precisión. Sin embargo, aumentar la frecuencia de muestreo implica pasar de 600 imágenes a 1500 imágenes por segundo. El tiempo de procesamiento del *stack* de imágenes aumenta y el consumo computacional también. Finalmente, en las probetas plásticas la tasa de muestreo fue alta y las gráficas no presentaron el ruido de los ensayos 1 y 2. Esto se debe al comportamiento reflectivo del material, mientras que esta propiedad en metales es elevada, los plásticos al ser opacos no presentan ese inconveniente generando una curva casi lineal.

Un resumen de los resultados obtenidos se presenta en la sección 3.3. En estas gráficas se aplicó el filtro Savitzky-Golay. En la sección 3.4 se muestran las respectivas curvas Esfuerzo - Deformación de todos los ensayos. Es interesante analizar el comportamiento de las gráficas y evidenciar la correcta construcción de una curva típica de esos materiales. En metales, se han logrado construir todas las zonas de interés: zona de comportamiento elástico y plástico, esfuerzo de fluencia, último y rotura (Callister, 2012). Para plásticos (polietileno de alta densidad) se obtuvieron las zonas de: deformación elástica lineal, no lineal, el límite elástico y la deformación plástica (Kitagawa et al., 1995).

Ahora, se analizan las diferencias entre las curvas “Shimadzu” e “ImageJ” mostradas en la sección 3.4. Debe considerarse que, la Shimadzu representa un porcentaje de desplazamiento de las mordazas durante el ensayo y, dentro de estas curvas se albergan diversos errores como: el resbalamiento de la probeta dentro de las mordazas, la deformación de zonas externas a la región de interés y por ello los valores de deformación son mayores a los obtenidos con la metodología. Es decir, se está midiendo la deformación de la longitud total de la probeta y no de la longitud de la zona paralela reducida que es la zona en que las imágenes están midiendo y la zona de interés del ensayo. Es decir, las mediciones realizadas con la cámara son efectivamente la deformación unitaria del material en la zona de interés, mientras que la curva del equipo Shimadzu es la deformación de material más deformaciones adicionales debidas a espacios del sistema y las mordazas.

La normativa (E28 Committee, 2021) propone la forma de las probetas para que exista rotura en la zona paralela constante y las deformaciones correspondientes al resto de la probeta son errores. Una medida precisa de comparación sería la utilización de un extensómetro *clip-on* que permitiera registrar la deformación unitaria en la zona calibrada. A pesar de esto, las curvas de esfuerzo graficadas corresponden efectivamente a una curva de un metal con comportamiento elástico hasta el 2% de la longitud calibrada y se evidencia el comportamiento plástico luego de la fluencia, lo mismo para las curvas de polímeros. Es decir, la metodología es más eficaz que las mediciones realizadas del equipo Shimadzu ya que es capaz de adquirir información dentro de la zona calibrada sin entrar en contacto con la probeta.

La metodología es robusta, la implementación rigurosa de cada una de las etapas hace posible la obtención de los resultados deseados, sin embargo, es necesario recalcar la importancia de la etapa 1. El proceso de configuración del sistema de imágenes es sin duda fundamental. Según IMAQ Vision Concepts Manual (2003), la forma de configurar su sistema depende del entorno de imágenes, el tipo de análisis y procesamiento a realizar. El sistema debería producir imágenes con suficiente calidad para poder extraer la información necesaria con el uso de la programación otorgada en este documento, de no ser así será necesario tomar en cuenta algunos aspectos adicionales. Por ejemplo, uno de ellos es colocar la cámara de modo que quede perpendicular a la probeta y evitar la adquisición de imágenes desde un ángulo produciendo errores de perspectiva, aunque estos puedan ser compensados se prefiere evitarlos. La iluminación es otro aspecto para considerar, la generación de brillos indeseados en la zona calibrada durante el ensayo hará imposible el procesamiento de las imágenes adquiridas más aún, si el análisis se realiza en base a contornos. Finalmente, el contraste de colores, los marcadores deberán ser seleccionados según la teoría del color. Los colores en contraste son los que se encuentran en posiciones directamente opuestas del círculo cromático como, por ejemplo, el rojo y el verde, en naranja y el azul, o el amarillo y el morado. Haciendo esto se asegura un procesamiento sencillo de las imágenes y la extracción de información confiable.

3.6.1 Análisis económico

La metodología presentada utiliza recursos disponibles en el mercado ecuatoriano, programas de uso gratuito y lenguaje de programación utilizado en la ESPOL. Esto hace que la solución mostrada sea accesible para cualquier estudiante de ingeniería. En la Tabla 3.1 se muestra el costo de la solución completa dando un total de \$1067.00 (\$267.00 sin pc dedicado), este valor representa el 3% del costo de un video extensómetro profesional medio, mientras que comparándolo con un extensómetro *clip-on* es el 15% del valor total. En la Tabla 3.2 se muestra el porcentaje sobre el valor de estos instrumentos, podría decirse que es viable adquirir un extensómetro, pero cabe resaltar que los extensómetros tienen rangos, es decir, mientras que se adquiere uno con alta sensibilidad para mediciones de hasta 500 mm, habrá que adquirir otro para mediciones mayores por lo que un laboratorio no se limitaría a comprar un instrumento sino algunos, convirtiéndose en una inversión incluso mayor. Se resalta también, que la metodología ha sido pensada para ser fácil de implementar y económica, aun a pesar de necesitar una preparación por parte del usuario en temas de fundamentos de imágenes para la correcta aplicación de la metodología, por lo que el operador deberá capacitarse para este fin. Los costos asociados a estas capacitaciones no se han contemplado en el costo de la metodología.

CAPÍTULO 4

4. CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

Conclusiones

El desarrollo de una metodología detallada y sistemática para el procesamiento de imágenes para probetas metálicas y plásticas fue realizado satisfactoriamente, pudiendo adquirir valores de deformación unitaria dentro de la zona paralela constante para materiales de pequeñas (metales) y de grandes (plásticos) elongaciones. Las 3 etapas descritas en el capítulo 2 son ahora un protocolo que seguir, totalmente replicable, técnicamente posible y económicamente viable. La metodología es lo suficientemente robusta para ser aplicada con confianza siempre y cuando sea seguido en su totalidad el protocolo descrito en este documento. Es posible aproximar una curva esfuerzo - deformación a partir de los datos obtenidos en este protocolo, sin embargo, para realizar una curva real se requiere extraer datos temporales (hora universal) de la celda de carga para asociarlos con los obtenidos con el sistema de adquisición propuesto.

Recomendaciones

Para llegar a una curva Esfuerzo - Deformación que es de interés mayormente académico, es indispensable poseer un sensor de fuerza programable, es decir, una celda de carga que se conecte a una tarjeta de adquisición de datos y puedan adquirirse valores de fuerza por reloj. Teniendo valores de hora, minuto, segundo y hasta milisegundo de la fuerza aplicada durante el ensayo, la programación podrá asociar esta variable a las imágenes adquiridas que poseen la misma información temporal y entonces será viable construir la curva con alta confiabilidad.

Para evitar errores de perpendicularidad es recomendable utilizar un ángulo de inspección perpendicular para obtener los resultados más precisos. Además, deberá asegurarse de que la lente tenga una profundidad de campo suficiente para mantener todos de los objetos enfocados independientemente de su distancia de la lente. También de que su lente tenga una distancia focal que coincida con los requerimientos del ensayo y que la iluminación proporcione suficiente contraste

entre la probeta y el fondo para hacer posible la extracción de información que se necesita de la imagen.

La utilización de distintos sensores de captura con mayor resolución y autoenfoco mejorarán los resultados obtenidos, además, la grabación de vídeo y posterior extracción de imágenes de este es otra opción viable para la etapa 1 de la metodología.

BIBLIOGRAFÍA

- Bailer, W. (2006). *Writing ImageJ Plugins—A Tutorial*. 50.
- Budynas, R. G., Nisbett, J. K., Murrieta Murrieta, J. E., Alatorre Miguel, E., & Shigley, J. E. (2008). *Diseño en ingeniería mecánica de Shigley* (8a ed). McGraw-Gill Interamericana.
- Callister, W. (2012). *Introducción a la ciencia e ingeniería de los materiales* (Reimpr). Reverté.
- CFRP-Analysis-Testing-and-Inspection-Evaluation-Instruments.pdf*. (s/f). Recuperado el 9 de octubre de 2022, de https://www.ssi.shimadzu.com/sites/ssi.shimadzu.com/files/pim/pim_document_file/ssi/others/14387/CFRP-Analysis-Testing-and-Inspection-Evaluation-Instruments.pdf
- E28 Committee. (2021). *Test Methods for Tension Testing of Metallic Materials*. ASTM International. https://doi.org/10.1520/E0008_E0008M-16AE01
- Escudero, M., Hernández-Fontes, J. V., Hernández, I. D., & Mendoza, E. (2021). Virtual Level Analysis Applied to Wave Flume Experiments: The Case of Waves-Cubipod Homogeneous Low-Crested Structure Interaction. *Journal of Marine Science and Engineering*, 9(2), 230. <https://doi.org/10.3390/jmse9020230>
- Gonzalez, R. C., & Woods, R. E. (2018). *Digital image processing* (Fourth edition, global edition). Pearson.
- Gracia, L. (2013, octubre 9). ¿Qué es OpenCV? *Un poco de Java*. <https://unpocodejava.com/2013/10/09/que-es-opencv/>
- Hernández, I. D., Vaz, M. A., Cyrino, J. C. R., & Alvarez, N. M. R. (2019). Three-dimensional image-based approach for imperfect structures surface modeling.

- Journal of the Brazilian Society of Mechanical Sciences and Engineering*, 41(9), 371. <https://doi.org/10.1007/s40430-019-1873-x>
- IMAQ Vision Concepts Manual*. (2003).
- ISO 6259-3:2015(en), Thermoplastics pipes—Determination of tensile properties—Part 3: Polyolefin pipes*. (2015). <https://www.iso.org/obp/ui/#iso:std:iso:6259:-3:ed-2:v1:en>
- Kaehler, A., & Bradski, G. R. (2017). *Learning OpenCV 3: Computer vision in C++ with the OpenCV library* (First edition, Second release). O'Reilly Media.
- Kitagawa, M., Zhou, D., & Qui, J. (1995). Stress-Strain curves for solid polymers. *Polymer Engineering and Science*, 35(22), 1725–1732. <https://doi.org/10.1002/pen.760352202>
- Press, W. H., & Teukolsky, S. A. (1990). Savitzky-Golay Smoothing Filters. *Computers in Physics*, 4(6), 669. <https://doi.org/10.1063/1.4822961>
- Qué es Visual Studio Code y qué ventajas ofrece*. (2022, julio 22). OpenWebinars.net. <https://openwebinars.net/blog/que-es-visual-studio-code-y-que-ventajas-ofrece/>
- Rodríguez Zalapa, O., Hernández Zavala, A., & Adalberto Huerta Ruelas, J. (2014). Sistema de medición de distancia mediante imágenes para determinar la posición de una esfera utilizando el sensor Kinect XBOX. *Polibits*, 49, 59–67. <https://doi.org/10.17562/PB-49-7>
- Zhang, Z. (2000). A flexible new technique for camera calibration. *IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence*, 22(11), 1330–1334. <https://doi.org/10.1109/34.888718>

APÉNDICES

APÉNDICE A

Calibración de la imagen por curvatura de la cámara

La calibración de las cámaras se realiza mediante el empleo de un tablero de ajedrez con cuadrados de 22 mm de longitud, como se muestra en la Figura 2.10. El principal objetivo de esta tarea es determinar parámetros de transformación entre un objeto, en un espacio tridimensional (3D), y su proyección al espacio bidimensional observado (2D) a partir de información visual (imagen). De este modo, al considerar las coordenadas 3D del mundo real para un punto arbitrario como $X = (X, Y, Z, 1)^T$, sus coordenadas 3D en una imagen de cámara 2D X_{cam} se transforman por medio de la siguiente expresión:

$$X_{cam} = [R \ t]X \quad (4.1)$$

donde R es una matriz de rotación 3×3 y t es una matriz de traslación 3×1 . Suponiendo que $x = (x, y, 1)^T$, así como para las coordenadas 3D de la imagen, el mapeo 3D a 2D se denota mediante la siguiente expresión:

$$K[R \ t]X \quad (4.2)$$

donde K es una matriz 3×3 del dispositivo de captura con sus parámetros intrínsecos, que se denota por:

$$K = \begin{bmatrix} f_x & 0 & 0 \\ 0 & f_y & c_y \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (4.3)$$

Donde f_x y f_y son las distancias focales del dispositivo de captura en los ejes x e y , y (c_x, c_y) son las coordenadas del punto focal central. Para determinar los parámetros intrínsecos y extrínsecos, se obtuvieron varias imágenes a partir del tablero de calibración, se encontraron todas las coordenadas del centroide de los puntos (determinado por las esquinas entre cuadros) en cada imagen. Estas coordenadas en la imagen corresponden a algunas coordenadas de puntos 3D en el mundo real. Todas las correspondencias

recopiladas se almacenaron y los parámetros de calibración se recuperaron utilizando las bibliotecas OpenCV (Kaehler & Bradski, 2017)

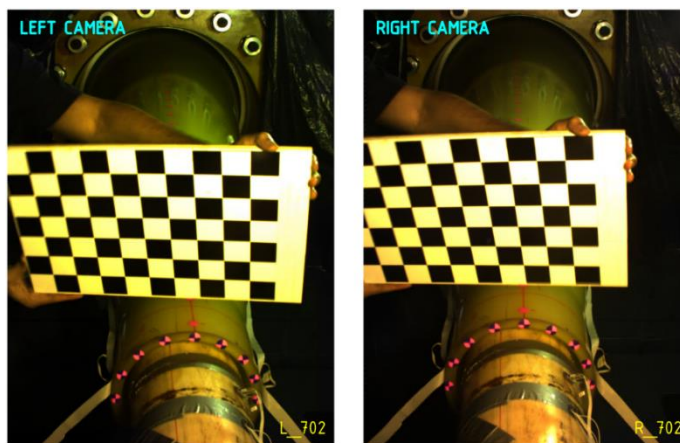


Figura 4.1 Ejemplo de capturas de imágenes para rectificación/calibración.

La rectificación de la imagen es una etapa necesaria después de determinar los parámetros de la cámara a través del algoritmo de ZHANG (2000), ya que existen diferentes tipos de distorsión en las imágenes de las cámaras digitales sin lentes telecéntricas. Las dos distorsiones principales son la radial y la tangencial. En la primera, las líneas rectas aparecerán curvas, pareciendo alejarse del centro de la imagen. En la última, el plano de la lente del dispositivo de captura no es perfectamente paralelo al plano de formación de imágenes; como resultado, algunas regiones de la escena pueden parecer más cercanas de lo esperado. Entonces, para hacer frente a las distorsiones en las imágenes capturadas, es necesario encontrar los coeficientes de distorsión (k_1, k_2, k_3, p_1 y p_2). Así, el problema de la distorsión radial se puede resolver usando las siguientes dos expresiones:

$$X_c = x(1 + k_1r^2 + k_2r^4 + k_3r^6) \quad (4.4)$$

$$Y_c = y(1 + k_1r^2 + k_2r^4 + k_3r^6) \quad (4.5)$$

de un modo similar, la distorsión tangencial se puede resolver usando las siguientes dos expresiones:

$$x_c = x + [2p_1xy + p_2(r^2 + 2x^2)] \quad (4.6)$$

$$y_c = y + [p_1(r^2 + 2y^2) + 2p_2xy] \quad (4.7)$$

APÉNDICE B

Código de OpenCV en Python para captura de imágenes

```
# -*- coding: utf-8 -*-
"""
Autores: Sophia (ESPOL)/David (UFRJ) v02
Ultima edición: 2022-07-22 01:07:50.234 (Brasil)
"""

import numpy as np
import cv2 as cv
from datetime import datetime
import time
import os

# Define el nombre del ensayo o probeta con un identificador unico
ensayo_ID = "Teste-003"

# Define el directorio donde se almacenaran las imágenes del ensayo
directorio_de_trabajo = "C:/TEMP"
os.chdir(directorio_de_trabajo)

o_pth = '{0:}/{1:}'.format(directorio_de_trabajo, ensayo_ID)

# Verifica si existe el directorio o_pth y crealo en su falta
if not os.path.exists(o_pth):
    os.makedirs(o_pth)

# Parámetros de comunicación
cap = cv.VideoCapture(0)
if not cap.isOpened():
    print("No es posible mostrar la camara")
    exit()

contador = 0

while True:
    # Capture cuadro-by-cuadro
    ret, cuadro = cap.read()
    # if cuadro is read correctly ret is True
    if not ret:
        print("No es posible retener algun Cuadro (Finalizar transmisión?).
Saliendo ...")
        break
```



```

#
## Ejemplos de operaciones de color sobre la imagen
# gray = cv.cvtColor(cuadro, cv.COLOR_BGR2GRAY)
# color_RGB = cv.cvtColor(cuadro,cv.COLOR_BGR2RGB)
#
# Mostrar la imagen capturada
cv.imshow('Imagen Capturada', cuadro)
# =====
# obtencion del tiempo instantaneo
now = datetime.now()
# formatación del tiempo instantaneo en formato string
current_time = now.strftime('%Y-%m-%d_%H.%M.%S.%f')[:-3]
#
img = cv.cvtColor(cuadro, cv.COLOR_BGR2RGB)
img = cv.cvtColor(img, cv.COLOR_RGB2BGR)
# Use la siguiente linea si es requerido guardar las imágenes sin cualquier
compresión
# cv2.imwrite(o_pth+'/{0:}_{1:}.png'.format(ensayo_ID,current_time), img,
[cv2.IMWRITE_PNG_COMPRESSION, 0])
# -----
# Use la siguiente linea si es requerido guardar las imágenes con una
compresión automática
cv.imwrite(o_pth+'/{0:}_{2:}_{1:}.jpg'.format(ensayo_ID,current_time,str(cont
ador).zfill(5)), img)
contador += 1
# Use la siguiente linea si es requerido condicionar una tasa de grabación
mas lenta/rápida
time.sleep(15)
# =====
if cv.waitKey(1) == ord('q'):
    break

# Cuando todo esté listo, liberar camara y cerrar todas las ventanas
cap.release()
cv.destroyAllWindows()

```

APÉNDICE C

Código en MACROS para preprocesamiento del paquete de imágenes (VCG)

```
// Declaración de variables
wd ="D:/Desktop/Ingenieria Mecanica/TESIS/Ensayos Mecanicos/";
testName = "ESPOL001";
macrosDirectory = wd + "Macros_IJ/";
imagesDirectory = wd + testName + "/";

/*****
 * Script para extracción de la region de interes (ROI),
 * la inclinación en las imágenes es también corregida
 *****/

// [1a]:> Importando las imágenes del ensayo
File.openSequence(imagesDirectory);
// [2a]:> Corrigiendo la rotación de las imágenes
correctionAngle = 0;
run("Rotate... ", "angle="+correctionAngle+" grid=150 interpolation=Bilinear
stack");
// [3a]:> Configurando la ROI con setTool("rectangle");
makeRectangle(125, 269, 247, 17);
// [4a]:> Extrayendo las ROIs y colocando la escala
run("Crop");
pixelsDistance = 183
mmDistance = 40.05
run("Set Scale...", "distance=" + pixelsDistance + " known=" + mmDistance
+ " unit=mm");
// [5a]:> Exportación de las ROIs a un archivo multicamada
saveAs("Tiff", wd + "ESPOL001_Cropped.tif");
close("*");
//-----
```

```
/******  
* Script para extracción de la región de interés (ROI),  
* la inclinación en las imágenes es también corregida  
*****/  
  
// [1b]:> Importando stack de ROIs  
open(wd + "ESPOL001_Cropped.tif");  
// [2b]:> Delimitando la región de análisis (puede ser linea también)  
makeRectangle(125, 269, 247, 17);  
// [3b]:> Visualización del perfil de intensidades  
run("Plot Profile");  
selectWindow("ESPOL001_Cropped.tif");  
// [4b]:> Extracción de coordenadas de los perfiles de intensidad  
runMacro(macrosDirectory + "Stack_Profiler.ijm");  
// [5b]:> Exportación de los perfiles a archivo de datos  
run("Input/Output...", "jpeg=85 gif=-1 file=.csv use_file copy_column  
copy_row save_column save_row");  
saveAs("Results", wd + testName + "_Profiles.csv");  
//-----
```

APÉNDICE D

Código en Python para generación de curvas de resultados

```
In [12]: %matplotlib notebook
```

```
In [1]: import numpy as np
import pandas as pd
import matplotlib.pyplot as plt
from scipy.misc import electrocardiogram
from scipy.signal import find_peaks

import os
import glob
```

En la celda siguiente cambiar la dirección de la carpeta de trabajo en la variable `wd`, y usar la variable `idx` para navegar entre los archivos.

```
In [3]: wd = r'D:\Desktop\Ingenieria Mecanica\TESIS\Ensayos Mecanicos\Datos de entrada'
os.chdir(wd)

archivos_de_resultados = glob.glob1(wd, "*.txt")
print("Los siguientes archivos fueron detectados:\n{0:}".format(archivos_de_resultados))

idx = 0

df = pd.read_csv(archivos_de_resultados[idx], delimiter = "\t", header=None, skiprows=1)
nombre_cols = ["id", "X (mm)"] + ["im"+str(int(v-1)) for v in df.columns[2:]]
df.columns = nombre_cols
df.head(5)
```

Los siguientes archivos fueron detectados:
['Ensayo001_Profiles.txt']

```
Out[3]:
```

	id	X (mm)	im1	im2	im3	im4	im5	im6	im7	im8	...	im692	im693	im694	im695	im696	im697	im698	im699	im700	im701
0	1	0.000	5.259	3.259	3.556	6.000	5.296	6.000	4.741	6.370	...	9.074	9.185	5.222	6.370	7.333	6.000	8.148	5.556	8.111	8.370
1	2	0.219	5.296	2.259	3.259	4.963	4.222	4.259	3.556	4.370	...	6.074	5.741	5.111	4.000	5.926	2.111	3.630	5.148	4.630	5.926
2	3	0.438	5.444	3.000	5.444	3.963	4.926	3.963	3.815	5.148	...	4.111	4.222	6.333	5.407	6.000	4.444	1.778	5.333	3.444	6.296
3	4	0.657	4.963	3.111	4.259	4.185	4.852	4.296	3.741	5.037	...	3.444	4.667	6.000	6.444	6.148	5.815	3.444	6.333	5.815	6.667
4	5	0.875	6.222	3.741	2.259	5.185	5.185	5.000	1.867	4.259	...	4.778	7.444	5.667	5.778	6.185	5.926	7.815	7.481	8.741	5.630

5 rows x 703 columns

Usar la siguiente celda para verificar el sentido de la señal bien como los valores apropiados de altura de referencia.

```
In [5]: def getPeaks(input_signal, prominence_level, height_level):
peaksDetected, properties = find_peaks(input_signal, prominence = prominence_level, height = height_level)
return peaksDetected

altura_signal= 90

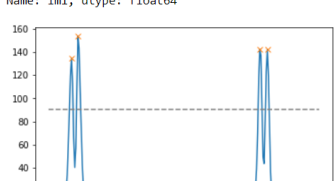
imagenes = df.columns[2:]

signal_input = df[imagenes[0]]
peaks = getPeaks(signal_input, 1.0, altura_signal)
```

```
print(df["X (mm)"][peaks])
print(signal_input[peaks])

plt.plot(signal_input)
plt.plot(peaks, signal_input[peaks], "x")
plt.plot(np.zeros_like(signal_input)+altura_signal, "--", color="gray")
plt.show()
```

```
21      4.596
27      5.909
196     42.895
203     44.427
Name: X (mm), dtype: float64
21     134.704
27     153.741
196     142.556
203     142.222
Name: im1, dtype: float64
```



Colocar los valores de referencia de altura apropiados en la variable **distancias** y en la variable **factor** use -1 para capturar mínimos o +1 para capturar máximos.

```
In [6]: def getDistanceVector(df0, preminence0, height0, factor=1.0):
    imagenes = df0.columns[2:]
    lst_out = []
    for i in range(len(imagenes)):
        signal_input = factor*df0[imagenes[i]]
        peaks = getPeaks(signal_input, preminence0, height0)
        lst_tmp = np.array(df0["X (mm)"][peaks])
        if factor == 1.0:
            distancia_temp = lst_tmp[3]-lst_tmp[0]
        else:
            distancia_temp = lst_tmp[1]-lst_tmp[0]

        lst_out.append(distancia_temp)

    return lst_out

distancias = getDistanceVector(df,1.0,altura_signal, 1)

dt = pd.DataFrame()
dt["Distancia"] = distancias
dt["Alargamiento"] = [v-distancias[0] for v in distancias]
dt["Deformacion"] = [100*v*(1/distancias[0]) for v in dt["Alargamiento"]]
```

```
nombre_salida = ['01-ResultsEdgeGaussian.out', '02-ResultsEdge.out', '03-ResultsGaussian.out']

dt.to_csv(nombre_salida[idx], sep='\t', header=True, index=False, decimal='.')
print('El archivo de datos procesados fue exportado exitosamente!')

dt.head(100)
```

El archivo de datos procesados fue exportado exitosamente!

```
Out[6]:
```

	Distancia	Alargamiento	Deformacion
0	39.831	0.000	0.000000
1	40.050	0.219	0.549823
2	40.050	0.219	0.549823
3	40.050	0.219	0.549823
4	40.050	0.219	0.549823
...
95	40.269	0.438	1.099646
96	40.269	0.438	1.099646
97	40.269	0.438	1.099646
98	40.269	0.438	1.099646
99	40.269	0.438	1.099646

```
In [7]: f1,ax = plt.subplots(1,3, figsize = (9,3), constrained_layout = True)
ax[0].plot(dt["Distancia"])
ax[1].plot(dt["Alargamiento"])
ax[2].plot(dt["Deformacion"])

for i in range(3):
    ax[i].set_xlabel("Frame")
    ax[i].grid()

ax[0].set_ylabel("Distancia (mm)")
ax[1].set_ylabel("Alargamiento (mm)")
ax[2].set_ylabel("Deformación (%)")

plt.show()
```

