

UNIVERSIDAD SAN FRANCISCO DE QUITO USFQ

Colegio de Ciencias e Ingenierías

**Caracterización de deformaciones mecánicas usando
correlación digital de imágenes
Proyecto de Titulación**

Karina Geovanna Alarcón Saltos

Ingeniería Mecánica

Trabajo de titulación presentado como requisito
para la obtención del título de
Ingeniera Mecánica

Quito, 23 de diciembre de 2015

UNIVERSIDAD SAN FRANCISCO DE QUITO USFQ
COLEGIO DE CIENCIAS E INGENIERÍA

**HOJA DE CALIFICACIÓN
DE TRABAJO DE TITULACIÓN**

Caracterización de deformaciones mecánicas usando correlación digital de imágenes

Karina Geovanna Alarcón Saltos

Calificación:

Nombre del profesor, Título académico

Lorena Bejarano, Ph.D. (c)

Firma del profesor

Quito, 23 de diciembre de 2015

Derechos de Autor

Por medio del presente documento certifico que he leído todas las Políticas y Manuales de la Universidad San Francisco de Quito USFQ, incluyendo la Política de Propiedad Intelectual USFQ, y estoy de acuerdo con su contenido, por lo que los derechos de propiedad intelectual del presente trabajo quedan sujetos a lo dispuesto en esas Políticas.

Asimismo, autorizo a la USFQ para que realice la digitalización y publicación de este trabajo en el repositorio virtual, de conformidad a lo dispuesto en el Art. 144 de la Ley Orgánica de Educación Superior.

Firma del estudiante: _____

Nombres y apellidos: Karina Geovanna Alarcón Saltos

Código: 00104560

Cédula de Identidad: 0923666051

Lugar y fecha: Quito, diciembre de 2015

RESUMEN

En este estudio, se ha explorado el método de Correlación Digital de Imágenes (DIC por sus siglas en inglés) para la medición de deformaciones de materiales metálicos, al estar sometidos a esfuerzos de tracción. El objetivo es entender y recrear exitosamente la técnica DIC. DIC es una técnica óptica no invasiva, que permite la medición de deformaciones en la superficie de la probeta, mediante el análisis de imágenes digitales del objeto sometido a ensayos mecánicos o térmicos. El trabajo realizado fue de carácter cuantitativo y experimental. El procedimiento usado para obtener los resultados se basó en tres etapas, las cuales son: preparación de la muestra, montaje del experimento y finalmente el post-procesamiento de imágenes. Los resultados obtenidos incluye el diagrama esfuerzo-deformación de un acero A36 y de un acero A36 como sustrato con recubrimiento de aleación de Fe, depositado por termorociado por arco eléctrico. Sobre la base de los resultados, es posible manifestar que se logró aplicar la técnica DIC exitosamente con altos niveles de precisión al replicar el comportamiento mecánico medido por la máquina de tracción; constituyéndose como un procedimiento experimental, que podría ayudar a predecir las zonas donde el material fallará debido a la mayor concentración de esfuerzos a tracción. Mediante este estudio, se ha demostrado la versatilidad de la técnica DIC para ensayos de tracción, de tal manera que a futuro sea posible emplear esta técnica de modo sistemático en futuros trabajos de investigación.

Palabras Clave: Correlación digital de imágenes (DIC), ensayo de tracción, comportamiento esfuerzo-deformación, termorociado

ABSTRACT

In this study, the Digital Image Correlation method (DIC) for strain measurements in metallic materials under tensile stress was studied. The objective was to understand and recreate the DIC technique successfully. DIC technique is an optical technique, that allows non-invasive measurement of displacements and deformations in the surface of a specimen by analyzing digital images of the object under stress. The DIC method is an image analysis based technique to analyze deformation of pixels in correlation to actual deformations (mechanical, thermal, etc). This work was quantitative and experimental. The procedure used to obtain the results was developed in three stages: sample preparation, experimental set-up, and, post-processing of the images. The results obtained included the stress-strain behavior of an A36 Steel, and A36 steel coated with an Fe-based layer deposited by arc spraying. According to the results, it was possible to confirm that the DIC technique was correctly implemented as it reflects the stress-strain curve similar to the one measured by the tensile testing machine. It is establishing itself as an experimental procedure that could help to predict areas where the material will fail due to the higher tensile stress concentration. Through this study, the versatility of the DIC technique for tensile testing was demonstrated, so that in the future it is possible to employ this technique in a systematic manner for research.

Keywords: Digital image correlation (DIC), tensile test, stress-strain, thermal spray.

TABLA DE CONTENIDO

Introducción	10
Desarrollo del Tema	14
Materiales.....	14
Métodos.....	17
Ensayo de tracción	17
Técnica de correlación digital de imágenes (DIC)	18
Resultados y discusiones	26
Análisis de las propiedades mecánicas del acero A36	27
Análisis del material con recubrimiento	32
Conclusiones y Recomendaciones.....	44
Referencias bibliográficas.....	47
Anexo A.....	50
Registro de control dimensional de las probetas	50
Anexo B.....	54
Configuración de la máquina de ensayos universal y su software	54
Anexo C.....	61
Instrucciones para empleo del software “Ncorr”	61
Anexo D.....	70
Obtención de los datos de desplazamiento del programa “Ncorr”	70

ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 1. Especificación de la muestra (ASTM)	14
Tabla 2. Composición química del acero A36 (Data, s.f.).....	15
Tabla 3. Especificaciones técnicas y capacidades de los instrumentos utilizados.....	16
Tabla 4. Configuración de la cámara	21
Tabla 5. Módulos de Young obtenidos experimentalmente.	26
Tabla 6. Propiedades mecánicas obtenidas experimentalmente para el Acero A36 por la técnica DIC. (Valor teórico referencial obtenido de (Data, s.f.)).....	29
Tabla 7. Módulo de Young para el acero con recubrimiento de Nanosteel.	33
Tabla 8. Propiedades mecánicas del acero A36 con recubrimiento de Nanosteel obtenidas con aplicación de DIC.....	34
Tabla 9. Comparación cuantitativa de la muestra BM y CM de la figura 10.....	36
Tabla 10. Módulo de elasticidad obtenido con DIC y extensómetro.....	40
Tabla 11. Módulo de elasticidad calculado con Ncorr	40

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1. Probeta seleccionada para la investigación (ASTM)	14
Figura 2. Muestra con recubrimiento	16
Figura 3. Patrón “Speckle”	19
Figura 4. (a) Dibujo esquemático de la configuración experimental y (b) configuración experimental actual para la muestra de base.	20
Figura 5. Gráfico esquemático del desplazamiento del subconjunto de la imagen inicial a la final. (Bing, Hui-min, Tao, & Asundi, 2009)	23
Figura 6. Diagramas Esfuerzo-Deformacion obtenidas con DIC para las muestras de acero A36: (a) BM-02, (b) BM-03, (c) BM-04, (d) BM-05, y (e) BM-06.....	28
Figura 7. Mapa de deformación en la dirección axial para: (a) región elástica, (b) límite elástico, (c) esfuerzo último y (d) antes de la fractura	30
Figura 8. Mapa de deformación en la dirección axial en escala 2.5% mayor a la escala original para: (a) Limite elástico, (b) Inicio de la zona de bandas de Lüders (c) durante la zona de bandas de Lüders, (d) Final de la zona de las bandas de Lüders.....	31
Figura 9. Propiedades de Tracción obtenidas con DIC para las muestras de acero A36 con recubrimiento de Nanosteel: (a) CM-01, (b) CM-02 y (c) CM-02.....	34
Figura 10. Diferencia de espesor entre la probeta con y sin recubrimiento	35
Figura 11. Comparación de longitudes finales de la probeta de acero con y sin recubrimiento	36
Figura 12. Mapa de deformación en la dirección axial para: (a) región elástica, (b) límite elástico, (c) esfuerzo último y (d) antes de la fractura	37

Figura 13. Mapa de deformación en la dirección axial en escala 2.5% mayor a la escala original para: (a) Limite elástico, (b) Inicio de la zona de bandas de Lüders (c) durante la zona de bandas de Lüders, (d) Final de la zona de las bandas de Lüders.	39
Figura 14. Curva esfuerzo-deformación para muestra con recubrimiento: (a) máquina de tracción y (b) técnica DIC.....	41
Figura 15. Micrografías del límite del sustrato con recubrimiento, (a) y (b) buena adherencia (c) y (d) adherencia deficiente.....	42

INTRODUCCIÓN

Correlación digital de imágenes (DIC) es una técnica óptica de campo completo no invasiva que permite la medición de deformaciones en la superficie de la probeta o espécimen de prueba, mediante el análisis de imágenes digitales del objeto sometido a ensayos mecánicos o térmicos. (Wang & Tong, 2013). El principio fundamental de la técnica consiste en tomar imágenes digitales durante el ensayo mecánico de la probeta desde su estado inicial (imagen de referencia) hasta su estado final (imagen deformada).

DIC ofrece una serie de ventajas respecto a otros métodos ópticos interferométricos, las cuales son: 1) montaje experimental y preparación de la muestra sencillo, 2) baja vulnerabilidad ambiental, 3) monitoreo continuo de desplazamientos, 4) procesamiento de datos relativamente sencillo y automático 5) posibilidad de visualización de la anisotropía en el plano , 6) sensibilidad de medición flexible y resolución espacial ajustable. (Bing, Hui-min, Tao, & Asundi, 2009)

DIC es una técnica que cobra cada vez más importancia en el área de investigación y el sector industrial para la medición de las propiedades mecánicas de diversos materiales, tales como: metales, materiales compuestos y polímeros. (Bing, Hui-min, Tao, & Asundi, 2009).

Conocer las propiedades mecánicas de los materiales, permite predecir el comportamiento mecánico del material al estar sometido a diferentes tipos de esfuerzos o solicitaciones. “El comportamiento mecánico de un material refleja la relación entre la fuerza aplicada y la respuesta del material a dicha fuerza” (Callister & Rethwisch, 2009). Entender dicho comportamiento, permite realizar una adecuada selección de materiales en el diseño mecánico de piezas, partes o estructuras, para así soportar con seguridad las

cargas y los requerimientos de diseño. De esta manera, se puede evitar fallas prematuras en el material o en el peor de los casos fallas críticas que conduzcan al colapso del material.

Entre las propiedades mecánicas más importantes se encuentra la rigidez, resistencia, dureza, ductilidad y tenacidad. Todas estas propiedades pueden ser determinadas utilizando un ensayo de tracción y la técnica DIC. La técnica DIC puede medir “el rango completo de deformación a nivel macroscópico durante un ensayo de tracción”. (Wang, y otros, 2010).

Con DIC es posible determinar la deformación, las propiedades elásticas y evidenciar el lugar donde se forma el encuellamiento de material previo a la rotura del mismo. De manera similar, la técnica DIC permite determinar las propiedades de tracción en el rango de deformación plástica del material. Las propiedades del material mencionadas previamente, se pueden obtener con la técnica DIC a igual que con el uso de las técnicas tradicionales.

En este estudio, es de gran interés evaluar la técnica DIC no solo en materiales tradicionales, sino también en materiales que poseen recubrimientos superficiales depositados con el proceso de termorociado.

El término Termorociado, conocido en inglés como “Thermal Spray”, describe un conjunto de procesos de recubrimientos superficiales termo-mecánicos, usados para la aplicación de recubrimientos metálicos y no metálicos, donde “el material de aporte en forma de polvo o alambre es fundido a temperatura inducida por una fuente de calor y es rociado a gran velocidad sobre la superficie del sustrato” (Marín Villar). Este tipo de recubrimientos es empleado en materiales que están expuestos a desgaste, fatiga, tensiones residuales, corrosión y degradación térmica; tales como las carcasas y cámaras de combustión de turbinas, cajas de rodamientos, alabes de turbinas, tuberías, entre otros.

Las principales propiedades que presentan los recubrimientos por termorociado son: resistencia a la corrosión/oxidación; maquinabilidad para el acabado; buenas propiedades eléctricas, tales como: conductividad, resistividad y rigidez dieléctrica; buenas propiedades magneto-ópticas, tales como: capacidad de absorción y reflectividad; buenas propiedades térmicas y propiedades mecánicas, tales como: adhesión, dureza, resistencia a fricción y desgaste, ductilidad y módulo de elasticidad. (Davis, 2004)

En aplicaciones de la ingeniería, es importante conocer el comportamiento mecánico del recubrimiento y el sustrato, para evaluar el desempeño y confiabilidad del material. De esta forma, los problemas relacionados con la formación de fisuras en el recubrimiento y los problemas de adherencia entre el recubrimiento y el sustrato pueden ser reducidos. (Hadad, y otros, 2007).

Por todo lo explicado anteriormente, es de gran interés entender el funcionamiento de la técnica DIC, este es un estudio preliminar de aplicación de la técnica DIC. Por tal motivo, el principal propósito de este proyecto fue recrear la técnica DIC para un ensayo de tracción. Posteriormente, se pretende caracterizar las propiedades mecánicas de un acero A36 y de un acero A36 con un recubrimiento de Nanosteel elaborado con termorociado, utilizando la técnica de correlación digital de imágenes. Este trabajo no pretende realizar una comparación exhaustiva entre la técnica tradicional de ensayos de tracción con la técnica DIC, para la obtención de las propiedades mecánicas de los materiales. Asimismo, no es de interés, analizar las variaciones de las propiedades mecánicas del material con recubrimiento respecto al material original, sino es únicamente caracterizarlas experimentalmente con la técnica DIC.

Este estudio iniciará examinando las etapas necesarias para el montaje y desarrollo del experimento, que permitirá obtener los datos que serán procesados y analizados como resultado de este proyecto.

DESARROLLO DEL TEMA

Materiales

Las muestras empleadas para esta investigación, fueron preparadas bajo la norma ASTM E8/E8M “Tension Testing of Metallic Materials”, tal como se indica en la figura 1.

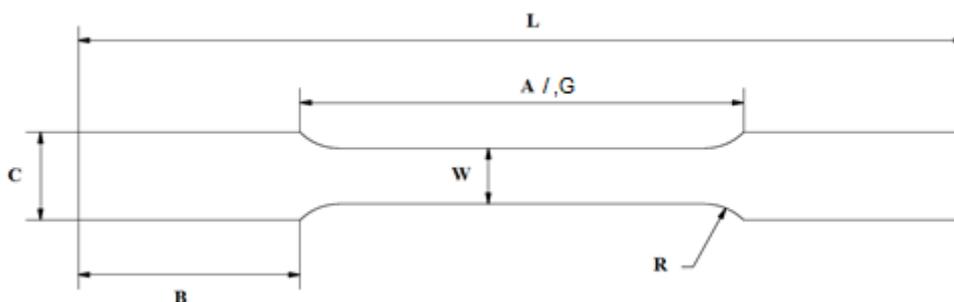


Figura 1. Probeta seleccionada para la investigación (ASTM)

Las dimensiones de la probeta de la figura 1, utilizada para desarrollar el método DIC, se presentan en la tabla 1.

Tabla 1. Especificación de la muestra (ASTM)

Partes de la muestra	Dimensiones
Ancho (W)	12.5 ± 0.2 mm
Radio del filete (R)	12.5 mm
Longitud total (L)	200 mm
Longitud de la sección reducida (A)	57 mm
Longitud de la sección de agarre (B)	50 mm
Ancho de la sección de agarre (C)	20 mm
Espesor	5 mm
Longitud de prueba (G)	50 ± 0.1 mm

El material seleccionado para la fabricación de las probetas fue un acero A36 de bajo contenido de carbono y laminado en caliente, la composición de este acero se muestra en la tabla 2.

Tabla 2. Composición química del acero A36 (*Data, s.f.*)

Elementos	Composición nominal [%]
Carbono (C)	0.25-0.29
Cobre (Cu)	0.20
Hierro (Fe)	98
Manganeso (Mn)	1.03
Fosforo (P)	<= 0.040
Silicio (Si)	0.28
Azufre (S)	<= 0.050

El proceso de manufactura de los especímenes, fue realizado con corte por chorro de agua. Este proceso de corte fue seleccionado para disminuir la formación de concentradores de esfuerzos, y la introducción de esfuerzos residuales y cambios en la microestructura del material; los cuales, pueden ser introducidos en el material al preparar las muestras a altas temperaturas. De esta manera, se puede evitar significativamente un cambio en las propiedades del material.

Se fabricaron 8 probetas planas en total, inicialmente se realizó una verificación dimensional de las mismas, para asegurar y registrar que satisfacen las dimensiones establecidas por la norma ASTM E8/E8M, los resultados de esta verificación están documentados en el anexo A.

De entre las 8 muestras, se seleccionaron aleatoriamente tres probetas planas para ser recubiertas. Se utilizó un recubrimiento de aleación de Hierro (Comercialmente Nanosteel), depositado con proceso de termorociado por proyección térmica de arco eléctrico. Este recubrimiento se colocó en ambas caras de la muestra, como se observa en la figura 2, con un espesor a cada lado de la pieza de 0.265 mm.



Figura 2. Muestra con recubrimiento

Los materiales, equipos y software utilizados en la parte experimental de este trabajo, se detallan en la tabla 3 con sus respectivas especificaciones y capacidades técnicas.

Tabla 3. Especificaciones técnicas y capacidades de los instrumentos utilizados

Instrumento	Especificaciones y Capacidades técnicas
Cámara Nikon D7000	<ul style="list-style-type: none"> - Sensor de imagen de 23.6 x 15.6 mm, sensor CMOS. - Total de pixeles de 16.9 millones. - Velocidad de obturación de 1/8000 a 30 s en pasos de 1/3 o ½ EV. - Velocidad de avance aproximado de 1 a 5 fps. - ISO 100 a 6400. - Punto de enfoque se puede seleccionar entre 39 o 11 puntos de enfoque. - Lente de 18.55 mm
Máquina de ensayos universal Tinius Olsen modelo 602	<ul style="list-style-type: none"> - Máxima fuerza aplicada de 300 KN. - Peso del equipo de 5444 kg. - Velocidad para realizar las pruebas de 0 a 76 mm/min. - Velocidad ajustable de la cruceta de 305 mm/min. - Altura de la máquina de 2445 mm. - Altura de la palanca de 222 mm.
Luces Led Blitz	<ul style="list-style-type: none"> - 10 Watts de luz fría Led. - Intensidad luminosa de 1050 lm - AC 110-240 Voltios.
Pintura	<ul style="list-style-type: none"> - Pintura en spray color blanco mate. - Pintura en spray color negro mate.
Desengrasante	<ul style="list-style-type: none"> - Removedor de grasa, suciedad y mugre de la superficie de la muestra.
Software VIC-2D	<ul style="list-style-type: none"> - No requiere calibración. - Sincronización de los datos adquiridos de carga. - Medición de deformaciones de muy alta precisión. - Alta resolución para medir deformaciones: 0.005% local o 0.001% global. - Medición de deformaciones de 2% o superiores. - Resolución del plano de 1/100000 FOV

Métodos

Para la realización de este trabajo, se adoptó por un diseño de tipo experimental para obtener el diagrama esfuerzo-deformación de un acero A36 y de un acero A36 con recubrimiento de NanoSteel. El diseño utilizado es la técnica de correlación digital de imágenes (DIC). Para obtener la medida de carga (esfuerzo), se empleó como apoyo los instrumentos convencionales para ensayos de tracción, incluidos en la máquina de ensayos universal

A continuación se describe el montaje de las muestras e instrumentos tanto para el ensayo de tracción convencional como para la aplicación de la técnica DIC.

Ensayo de tracción.

El ensayo de tracción fue realizado de acuerdo a lo especificado en la Norma ASTM E8/E8M “Standard Test Methods for Tension Testing of Metallic Materials”. Se describe el proceso para la ejecución de este ensayo, en el anexo B.

Procedimiento experimental para el ensayo de tracción.

Ensamblada la plataforma final de pruebas, se procede a realizar el ensayo de tracción. Se realizaron dos pruebas diferentes, para la obtención de los datos de esfuerzo, y deformación y tiempo de las muestras ensayadas (datos que fueron utilizados en la técnica de correlación digital de imágenes). Como primera prueba, se realizaron mediciones en rango elástico del material utilizando un extensómetro para medir deformación. Mientras que, en la segunda prueba, se ejecutó el experimento hasta la fractura del espécimen.

La tasa de desplazamiento programado en la máquina de tracción fue de 0,7 mm / min, de acuerdo con las especificaciones de la norma ASTM E8 /E8M.

Los datos de las pruebas de tracción realizadas, fueron recolectados por el software Horizon de la máquina de tracción TINIUS, datos que pueden ser exportados en formato .CSV, para su posterior análisis en otro software especializado compatible.

Técnica de correlación digital de imágenes (DIC).

La técnica de correlación digital de imágenes consta de tres etapas, las cuales son: preparación de la muestra, montaje del experimento y post-procesamiento.

Preparación de la muestra para la técnica DIC.

La superficie de las probetas que son utilizadas en los ensayos DIC debe presentar una imagen con una distribución aleatoria de intensidad en la escala de grises, es decir un patrón de puntos irregularmente distribuidos, conocido como patrón “speckle”. Este patrón permite realizar un correcto rastreo del desplazamiento de píxeles en la imagen para su posterior análisis, el patrón indicado puede originarse directamente en la muestra si el color y la textura del material en función del acabado superficial así lo permiten, caso contrario será necesario aplicar una capa de pintura para lograr el patrón “speckle”. Gracias al patrón citado, el software es capaz de identificar y calcular los desplazamientos de los píxeles con precisión, obteniendo resultados con bajos porcentajes de error y altos coeficientes de correlación.

En este proyecto, debido al acabado superficial de los materiales utilizados en las probetas de prueba, obligatoriamente se debe generar el patrón “speckle” con el uso de pintura. Antes de realizar el patrón “speckle” es necesario limpiar la superficie lateral de las probetas con desengrasante para eliminar la acumulación de grasa y suciedad. La limpieza de la probeta permite una mejor adherencia de la pintura a la superficie del metal, evitando el desprendimiento prematuro de la misma.

Una vez limpia la superficie lateral del material, se procede a depositar el patrón “speckle” con pintura en spray blanca y negra. El procedimiento, para la elaboración de este patrón se explica a continuación:

1. Aplicar cuatro capas de pintura color blanco mate sobre la superficie lateral de muestra. La pintura se debe aplicar desde una distancia de 15 centímetros de la muestra. Al colocar las capas de pintura, se debe evitar la formación de burbujas y grumos de pintura sobre la superficie. Cada capa de pintura debe curar (endurecimiento o secado) por un período de 30 minutos, antes de la aplicación de la siguiente.
2. Para generar el patrón “speckle” en la muestra, se debe aplicar cuatro capas de pintura color negro mate sobre las capas de pintura blanca, a una distancia de 30 centímetros y a un ángulo de 45 grados respecto a la superficie de la muestra. En la figura 3, se puede observar el patrón “speckle” utilizado para la correlación digital de imágenes de las muestras a estudiar.

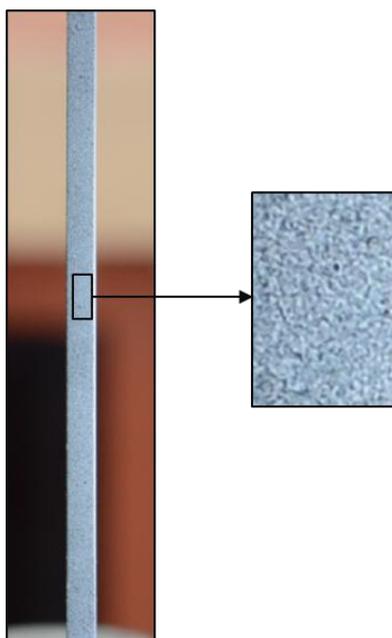


Figura 3. Patrón “Speckle”

Montaje experimental para la técnica DIC.

La plataforma de pruebas diseñada para realizar el experimento, se ilustra en la figura 4. La plataforma consta de los siguientes componentes: máquina de ensayos universal Tinius Olsen, una cámara Nikon D7000, un lente de 18.55 mm, un trípode, dos luces Led de alta intensidad y la probeta con el patrón “speckle”.

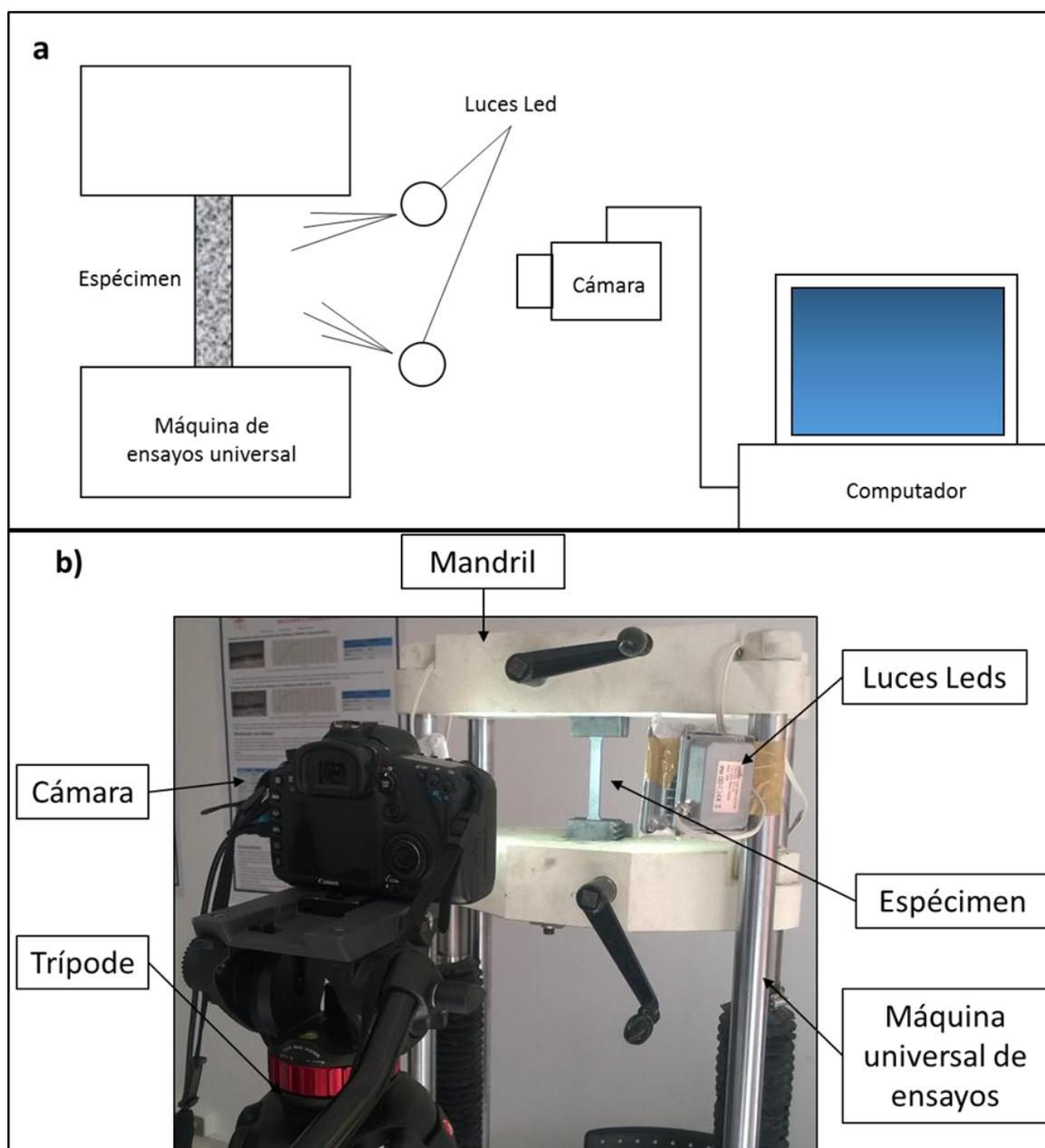


Figura 4. (a) Dibujo esquemático de la configuración experimental y (b) configuración experimental actual para la muestra de base.

Las muestras con el patrón “speckle” fueron montadas en la máquina de ensayos universal, tal como se explicó en la sección de ensayo de tracción. Con la probeta acoplada en el equipo, se ubicó las luces Led en la parte lateral de la máquina de tracción enfocando la pieza, tal como se muestra en la figura 4 (b). El objetivo de usar las luces Led es para incrementar y mejorar el contraste de las imágenes. Por otra parte, se monta la cámara en el trípode, asegurándose fijación, que esté nivelada y se ubica el lente de la cámara a una distancia de 30 centímetros de la muestra.

Finalizado el montaje del experimento, se procede a configurar las opciones de la cámara, para obtener una imagen clara y con alto contraste. En la tabla 4 se especifican dichas configuraciones.

Tabla 4. Configuración de la cámara

Configuración	Valor
Valor ISO	500
Distancia focal F	F5.6
Velocidad de obturación	1/200
Intervalo de obturación	5 segundos

Después de completar la configuración de la cámara, se puede iniciar con el experimento. La captura de imágenes y la toma de datos de la máquina de tracción está sincronizada. Durante el ensayo, el sistema de la cámara debe permanecer estático, evitando vibraciones ambientales.

Dos tipos de pruebas fueron elaboradas en este trabajo. En la primera prueba, se realizó la captura de imágenes en el rango elástico, a fin de calcular el módulo de Young de las probetas ensayadas. En la segunda prueba, la captura de imágenes se ejecutó hasta la

fractura del material, para obtener las propiedades de tracción de las muestras como: esfuerzo de fluencia, esfuerzo último de tracción y deformación.

Para todas las muestras ensayadas, la resolución de las imágenes fue de 5184 x 3456 píxeles, con un tamaño de 6.22 MB. Todas las imágenes fueron tomadas sobre la cara lateral de las probetas en relación a su posición de montaje en la máquina de ensayos universal.

Post-Procesamiento para la técnica DIC.

En la etapa de post-procesamiento, los desplazamientos de los píxeles seleccionados en la superficie de la imagen son rastreados por el software especializado, evaluando el cambio de posición de numerosos grupos de píxeles en base a la escala de grises de la imagen de la muestra deformada (Canal, Molina, Gonzáles, Segurado, & Llorca).

En esta etapa, un subconjunto cuadrado de dimensiones $(2M + 1) \times (2M + 1)$ píxeles centrado en el punto $P(x_0, y_0)$ de la imagen de referencia se elige y se utiliza para encontrar su nueva ubicación en la imagen deformada (Bing, Hui-min, Tao, & Asundi, 2009), donde M corresponde a una longitud en píxeles seleccionada en función de la resolución de la imagen. Para identificar el subconjunto de la imagen inicial en la imagen final se calcula el valor medio de la escala de grises presente en cada subconjunto, tal como se esquematiza en la siguiente imagen:

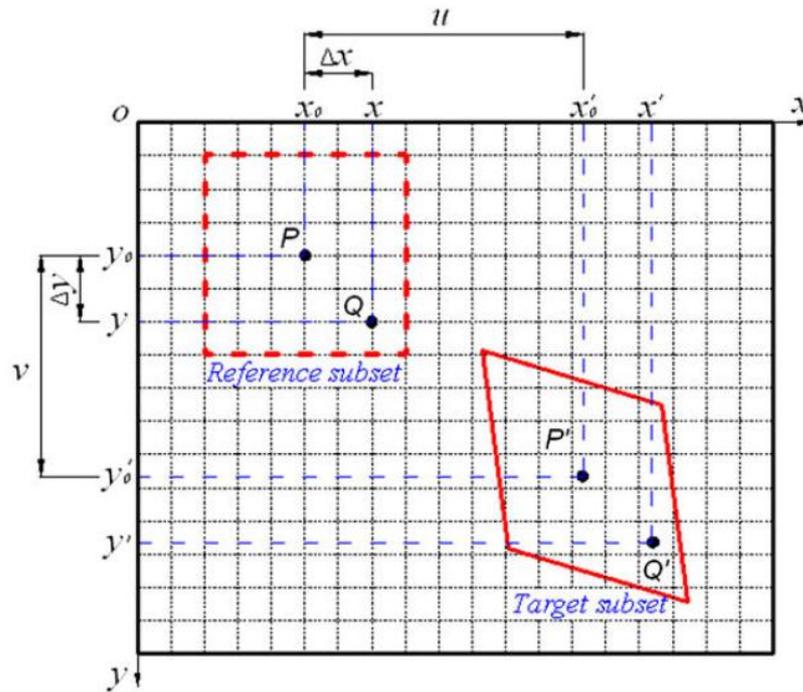


Figura 5. Gráfico esquemático del desplazamiento del subconjunto de la imagen inicial a la final. (Bing, Hui-min, Tao, & Asundi, 2009)

Una vez encontrada la nueva ubicación del subconjunto en la imagen deformada (figura 16), los componentes de desplazamiento del centro del subconjunto de referencia pueden ser determinados mediante la aplicación de diversos criterios de correlación. Uno de los criterios de correlación más usado es el “Zero Correlación Cruzada Normalizada” (ZNCC) (Bing, Hui-min, Tao, & Asundi, 2009), que identifica con la ecuación (1):

$$C_{f,g}(p) = \sum_{x=-M}^M \sum_{y=-M}^M \left[\frac{f(x,y) - f_m}{\sqrt{\sum_{x=-M}^M \sum_{y=-M}^M [f(x,y) - f_m]^2}} - \frac{g(x',y') - g_m}{\sqrt{\sum_{x=-M}^M \sum_{y=-M}^M [g(x',y') - g_m]^2}} \right]^2 \quad (1)$$

$$f_m = \frac{1}{(2M+1)^2} \times \sum_{x=-M}^M \sum_{y=-M}^M [f(x,y)] \quad (2)$$

$$g_m = \frac{1}{(2M + 1)^2} \times \sum_{x=-M}^M \sum_{y=-M}^M [g(x', y')] \quad (3)$$

$$p = (u, u_x, u_y, v, v_x, v_y)^T \quad (4)$$

Donde, $f(x, y)$ es la intensidad en escala de grises de las coordenadas (x, y) en el subconjunto de referencia de la imagen de referencia y $g(x', y')$ es la intensidad en escala de grises de las coordenadas (x', y') en el subconjunto de búsqueda de la imagen deformada. Los términos f_m (Ecuación 2) y g_m (Ecuación 3) son los valores medios de intensidad del subconjunto de referencia y de búsqueda respectivamente. El término p (Ecuación 4) denota el vector deseado con respecto a los seis parámetros de asignación. (Bing, Hui-min, Tao, & Asundi, 2009)

Si el subconjunto analizado es lo suficientemente pequeño, se asume que cada uno de los puntos $Q(x, y)$ ubicados alrededor del punto $P(x_0, y_0)$ del subconjunto de referencia, les corresponde un nuevo punto $Q(x', y')$ en el subconjunto de destino de acuerdo con la siguiente función de mapeo de desplazamiento, como se observa en la figura 16 (Bing, Hui-min, Tao, & Asundi, 2009):

$$x' = x_0 + \Delta x + u + u_x \Delta x + u_y \Delta y \quad (5)$$

$$y' = y_0 + \Delta y + v + v_x \Delta x + v_y \Delta y \quad (6)$$

Donde u y v son los componentes de desplazamiento del punto P en las direcciones x y y . Los términos Δx y Δy son las distancias desde el punto P al punto Q . Por último, los términos u_x, u_y, v_x, v_y son los componentes del gradiente de desplazamiento del el subconjunto. (Bing, Hui-min, Tao, & Asundi, 2009)

Las imágenes adquiridas en el proceso experimental, son analizadas en el programa VIC-2D System. Cabe recalcar que para este trabajo, se utilizó la versión con una licencia de prueba de este programa, debido a que VIC-2D no es un programa de acceso libre. El manejo del software VIC-2D System es sencillo de realizar, en virtud de su interfaz e amigable. Para entender el funcionamiento del programa, se puede referir al manual "VIC-2D Reference Manual" (VIC-2D Reference Manual). Un programa alternativo que puede ser utilizado para el post-procesamiento de las imágenes es el módulo abierto 2D- DIC Matlab software "Ncorr v1.2". La instalación y manejo de este programa, se detalla en el anexo C.

Una vez finalizado el post-procesamiento se obtuvo los valores de deformación unitaria de las muestras seleccionadas y empleadas para estos ensayos experimentales. Con ayuda de la máquina de tracción, se obtuvo los valores de esfuerzo correspondiente a cada imagen de las muestras capturada por la cámara fotográfica; lo que permite relacionar las variables de esfuerzo y deformación, para así realizar las gráficas del comportamiento mecánico de los materiales empleados en este estudio, considerando los valores de deformación obtenidos a través de la técnica DIC y los valores de esfuerzo del registro informático de la máquina universal de ensayos.

Resultados y Discusiones

En primera instancia, para verificar la exactitud del método DIC en la determinación de las propiedades mecánicas obtenidas del diagrama esfuerzo - deformación de las muestras de acero con y sin recubrimiento, se procedió a calcular el módulo de Young de las muestras de acero A36. Los valores obtenidos con la técnica DIC y el extensómetro se muestran en la tabla 5. En la tabla 5, se identifica las muestras de acero A36 como material base (BM). Es importante especificar que el análisis DIC fue elaborado con imágenes de la cara lateral de las muestras, por cuanto este análisis generó mejores resultados en comparación a las fotografías de la cara frontal. Este análisis produjo mejores resultados, debido a que la rugosidad de la superficie del lado lateral de la muestra, puede influenciar en el incremento significativo del grado de adherencia de la pintura en la superficie de la muestra (Pereyra).

Tabla 5. Módulos de Young obtenidos experimentalmente.

Especímenes	Módulo de Young obtenido con DIC [GPa]	Módulo de Young obtenido con el extensómetro [GPa]
BM-02	207	234.9
BM-03	209	220.0
BM-04	208	184.6
BM-05	214	183.0
BM-06	209	193.0

A partir de los datos de la tabla 5, se calcula la media y la desviación estándar para los dos métodos. Se obtiene una media de 209.4 [GPa] con una desviación estándar de 2.41 para la técnica DIC y 203.1 [GPa] con una desviación estándar de 20.71 para el extensómetro. Demostrando así que la técnica DIC tiene un bajo nivel de dispersión. Asimismo, el porcentaje de error con respecto al valor teórico del acero A36 de 200 [GPa] (Data, s.f.) fue de 4.5% con un coeficiente de correlación de las imágenes de 0.998. De esta

forma, se comprueba que la técnica DIC es válida, con altos valores de precisión y por lo tanto, puede ser implementado para obtener el diagrama esfuerzo- deformación del acero A36 con y sin recubrimiento. Sobre la base de este análisis, es posible predecir que su uso genere también buenos resultados con otros materiales.

Análisis de las propiedades mecánicas del acero A36.

Con los datos de la deformación obtenidos en la etapa de post-procesamiento con la técnica DIC y los valores de esfuerzo registrados por la máquina de tracción, se graficó la curva de esfuerzo-deformación para las cinco muestras de acero A36, como se puede observar en la figura 6.

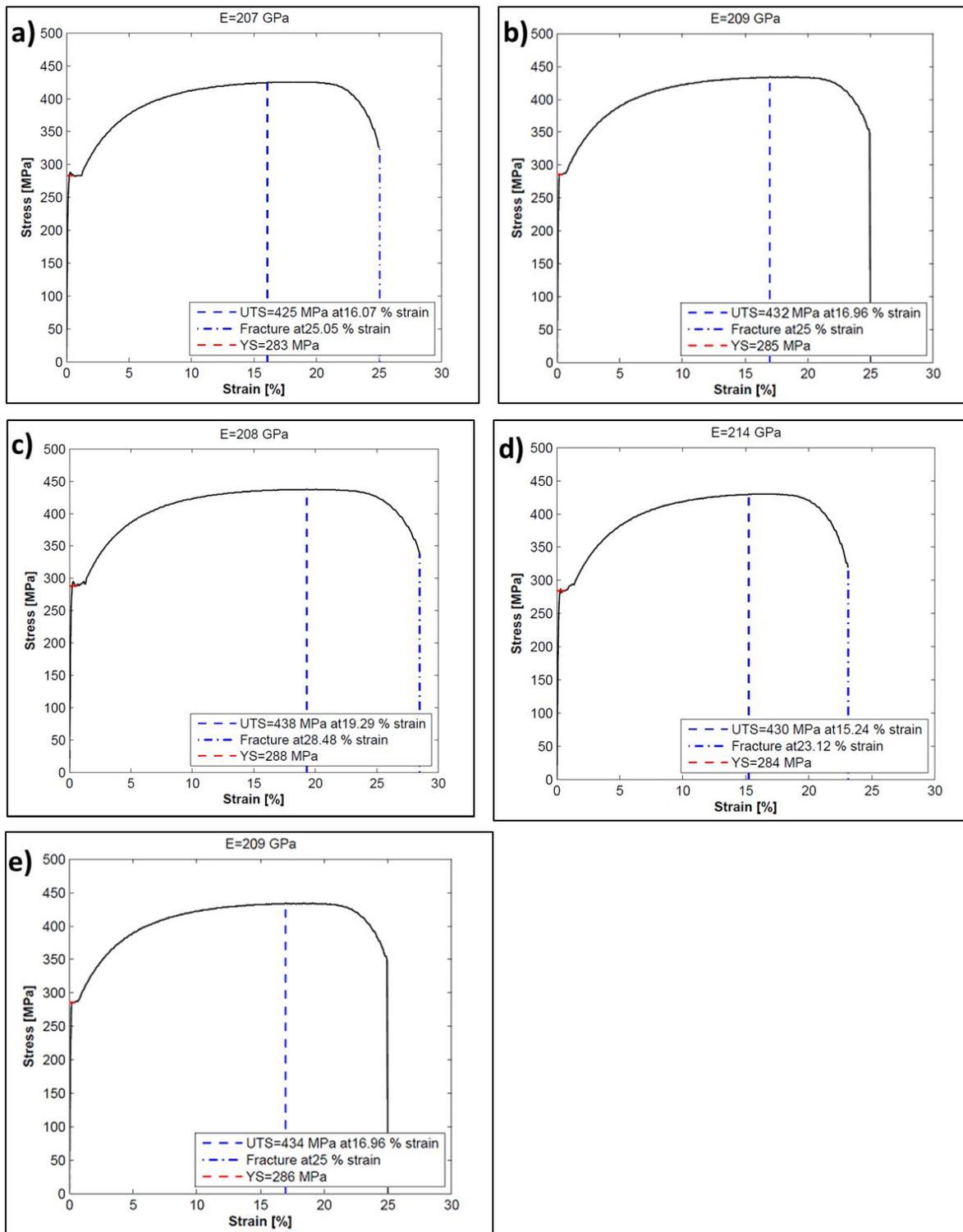


Figura 6. Diagramas Esfuerzo-Deformación obtenidas con DIC para las muestras de acero A36: (a) BM-02, (b) BM-03, (c) BM-04, (d) BM-05, y (e) BM-06.

La figura 6 muestra la curva típica de esfuerzo-deformación hasta la fractura de un material dúctil. La transición elasto-plástica, conocida como el efecto de las Bandas Lüders o fenómeno de discontinuidad del punto de fluencia, está muy bien definido. Este efecto

ocurre de forma espontánea, cuando la deformación plástica se inicia con una disminución de la tensión en el límite de fluencia superior, la deformación prosigue bajo una tensión que fluctúa ligeramente alrededor de un valor constante, denominado punto de fluencia inferior (Callister & Rethwisch, 2009). El efecto de las bandas de Lüders termina cuando el esfuerzo incrementa con una deformación creciente.

A partir de las curvas esfuerzo – deformación de la figura 6, se determina las propiedades mecánicas detalladas en la tabla 6.

Tabla 6. Propiedades mecánicas obtenidas experimentalmente para el Acero A36 por la técnica DIC. (Valor teórico referencial obtenido de (*Data, s.f.*))

Especímenes	Esfuerzo de fluencia [MPa]	Esfuerzo último [MPa]	Deformación [%]
Valor teórico	250	400-550	20-23
BM-02	283	425	25.1
BM-03	285	432	25.0
BM-04	288	438	28.5
BM-05	284	430	23.1
BM-06	286	434	25.0

A partir de los datos de la tabla 6 se calculan las medias de las propiedades de los especímenes de prueba, obteniendo un valor de 285.2 MPa para el esfuerzo de fluencia y 25.34% para la deformación; a partir de estos datos se evidencia que el porcentaje de error para el esfuerzo de fluencia es de 14.09 % respecto al valor teórico de 250 MPa; mientras que para la deformación el porcentaje de error es de 10.17 % con respecto al valor máximo de deformación teórica de 23%. Los valores del esfuerzo último experimental están dentro del rango de los datos teóricos, como se observa en la tabla 6. La dispersión de los datos que se presentan durante las pruebas pueden deberse a las siguientes causas:

- Problemas de agarre con las mordazas.

- Vibraciones de la cámara y efectos ambientales en el laboratorio, debido a no contar con un emplazamiento rígido para la cámara y completamente aislado contra vibración. (Wang & Tong, 2013).

Por otro lado, los mapas de deformación de las muestras de acero fueron obtenidos con el software VIC-2D. El resultado se muestra en la figura 7. En la figura 7 se observa el desplazamiento en dirección axial de la muestra en cuatro zonas de la curva de esfuerzo-deformación utilizando la técnica DIC. Se presenta el mapa de desplazamiento de la muestra BM-02.

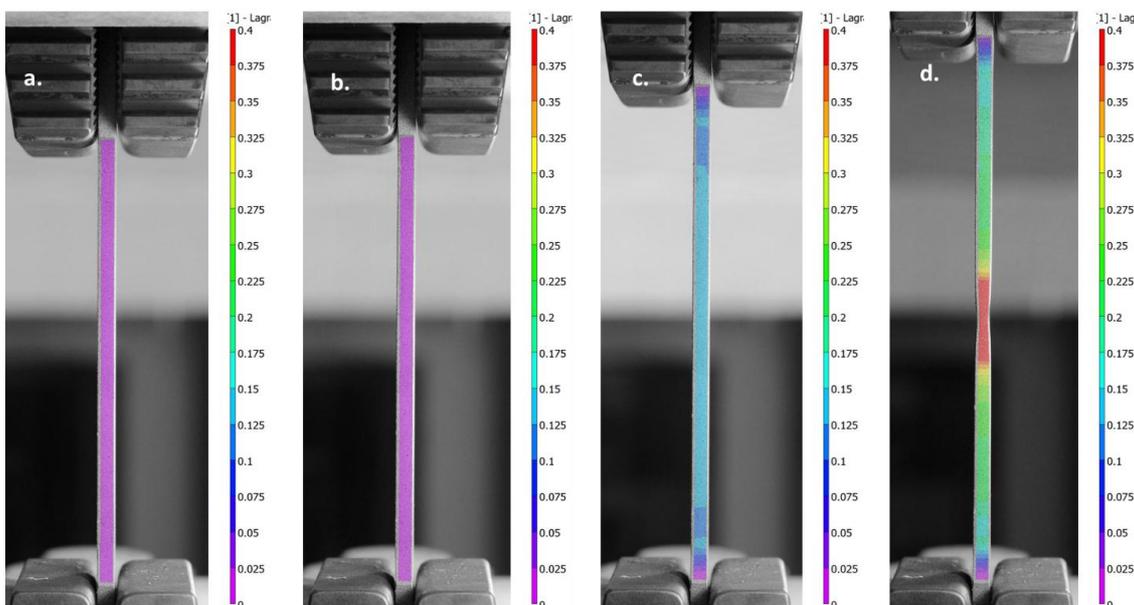


Figura 7. Mapa de deformación en la dirección axial para: (a) región elástica, (b) límite elástico, (c) esfuerzo último y (d) antes de la fractura

La diferencia de colores en la figura 7, significa la variación de la deformación en la muestra. El color violeta representa los valores más bajos de deformación, mientras que el color rojo se designa para los valores más altos de deformación. La barra ubicada a la derecha de la imagen indica el valor adimensional de deformación unitaria en la dirección 'y'

La figura 7 (a) ilustra la deformación en dirección axial de la muestra en la zona elástica, donde se observa una deformación menor a 0.025. Este valor está lo

suficientemente cercano a la línea recta que se traza paralela al segmento elástico de la curva de esfuerzo-deformación para un material dúctil, que es 0.002. En la figura 7 (b), la muestra se encuentra en el límite elástico, donde se puede observar que las deformaciones se mantienen en el orden de 0.025.

Cuando el material entra en la región plástica, la deformación de la pieza aumenta sucesivamente. En la figura 7 (c), la pieza se encuentra en el punto del esfuerzo último, donde se puede observar una deformación en el orden de 0.15. Una vez que se excede la tensión máxima que puede tolerar el material, se producirá la rotura. La figura 7 (d) indica el comportamiento del material 5 segundos antes de su rotura. En esta imagen, se puede observar que la mayor deformación ocurre en la zona central de la probeta, con un valor aproximado de 0.4. Para observar con mayor detalle las deformaciones en la dirección axial de la muestra, se alteró la escala del análisis en un orden de 2.5% mayor que la escala original (Ver figura 8).

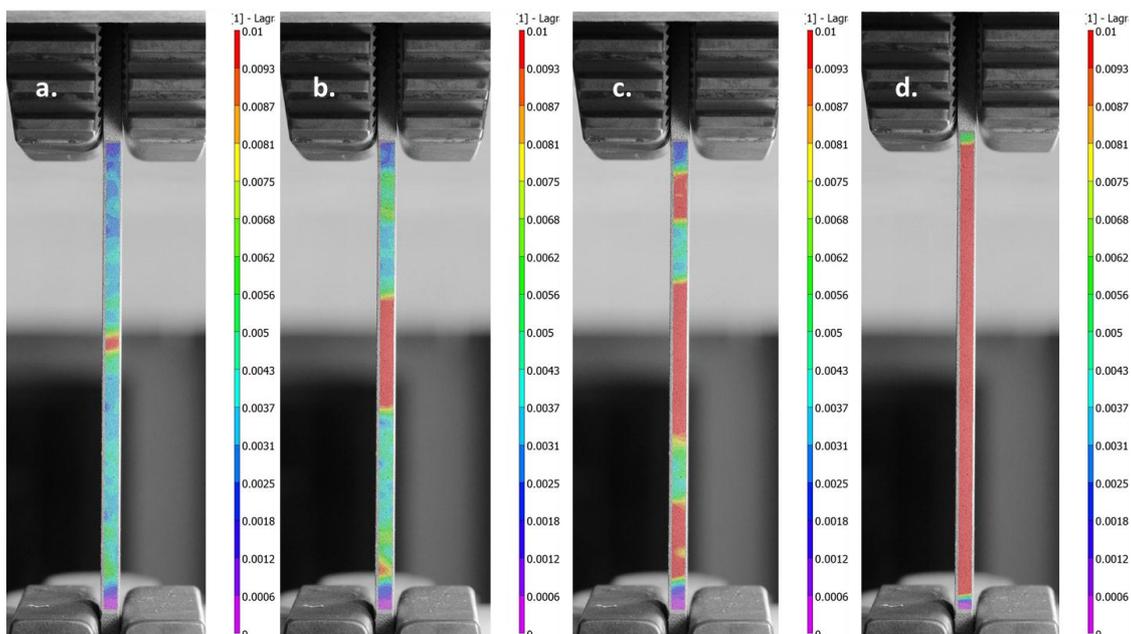


Figura 8. Mapa de deformación en la dirección axial en escala 2.5% mayor a la escala original para: (a) Límite elástico, (b) Inicio de la zona de bandas de Lüders (c) durante la zona de bandas de Lüders, (d) Final de la zona de las bandas de Lüders

La figura 8 (a) muestra un incremento en la deformación en la zona central de la probeta, con un valor aproximado al 0.01. Realizando una comparación entre las figuras 8 (a) y 7 (d), la zona donde el encuellamiento se formó, corresponde al punto de máxima deformación cuando la muestra se encuentra en su límite elástico (Wang, y otros, 2010). El inicio de la formación de las bandas de Lüders empieza en la región con mayores concentradores de esfuerzos, lugar donde la deformación plástica se concentra y se producirá la fractura del espécimen (Publishing, s.f.). Por lo tanto, la técnica DIC podría ayudar a predecir el lugar donde el material va a fallar sin alcanzar la zona de deformación plástica. De la misma manera, otro resultado que emerge de este análisis, es que se observa indicios de que el fenómeno de discontinuidad del punto de fluencia (efecto de las bandas de Lüders) podría iniciar en el punto donde el material fallara (Schwab & Ruff, 2013) , tal como se observa en la figura 8 (b).

En la figura 8 (c) es posible divisar una tendencia en la deformación del material. Según el análisis de las imágenes, se observa que la deformación inicialmente se concentra en la zona central de la probeta, esta deformación corresponde a la formación de bandas de Lüders. La deformación se expande progresivamente hacia los extremos de la muestra, lo que indica que las bandas de Lüders se van extendiendo en toda la superficie de la probeta, como se muestra en la figura 8 (d). La deformación de Lüders inicia inmediatamente después de que el material excede su límite de fluencia. Este punto corresponde a una deformación unitaria de 0.01y una carga axial de 284 N.

Análisis del material con recubrimiento.

Las muestras de acero A36 con recubrimiento por Nanosteel utilizadas en la segunda parte de esta evaluación, fueron clasificadas como “coated material” (CM). El análisis DIC fue

realizado con imágenes de la cara lateral de las muestras, de igual forma como se ejecutó en el experimento previo. De esta manera, el patrón “speckle” se mantiene en la superficie lateral del material durante todo el ensayo sin presentarse desprendimientos. El recubrimiento frontal de la pieza no fue utilizado para el patrón “speckle”, debido a la presencia de agrietamiento y desprendimiento de recubrimiento del sustrato. Este agrietamiento y desprendimiento incrementan a medida que se realiza el ensayo de tracción, generando que sea imposible conservar un el patrón “speckle” en esta área. Sin el patrón “speckle”, la correlación digital de imágenes no puede ser desarrollada.

De igual manera que en el experimento anterior, los datos de deformación se obtuvieron del post-procesamiento de las imágenes, y los valores de esfuerzo fueron registrados por la máquina de tracción. Con dichos valores, se procedió a calcular el módulo de elasticidad de las muestras con recubrimientos, registrando los resultados en la tabla 7.

Tabla 7. Módulo de Young para el acero con recubrimiento de Nanosteel.

Especímenes	Módulo de Young [GPa]
CM-01	165.8
CM-02	167.3
CM-03	168.8

Adicionalmente, se graficó las curvas de esfuerzo-deformación de las tres probetas ensayadas, tal como se ilustra en la figura 9.

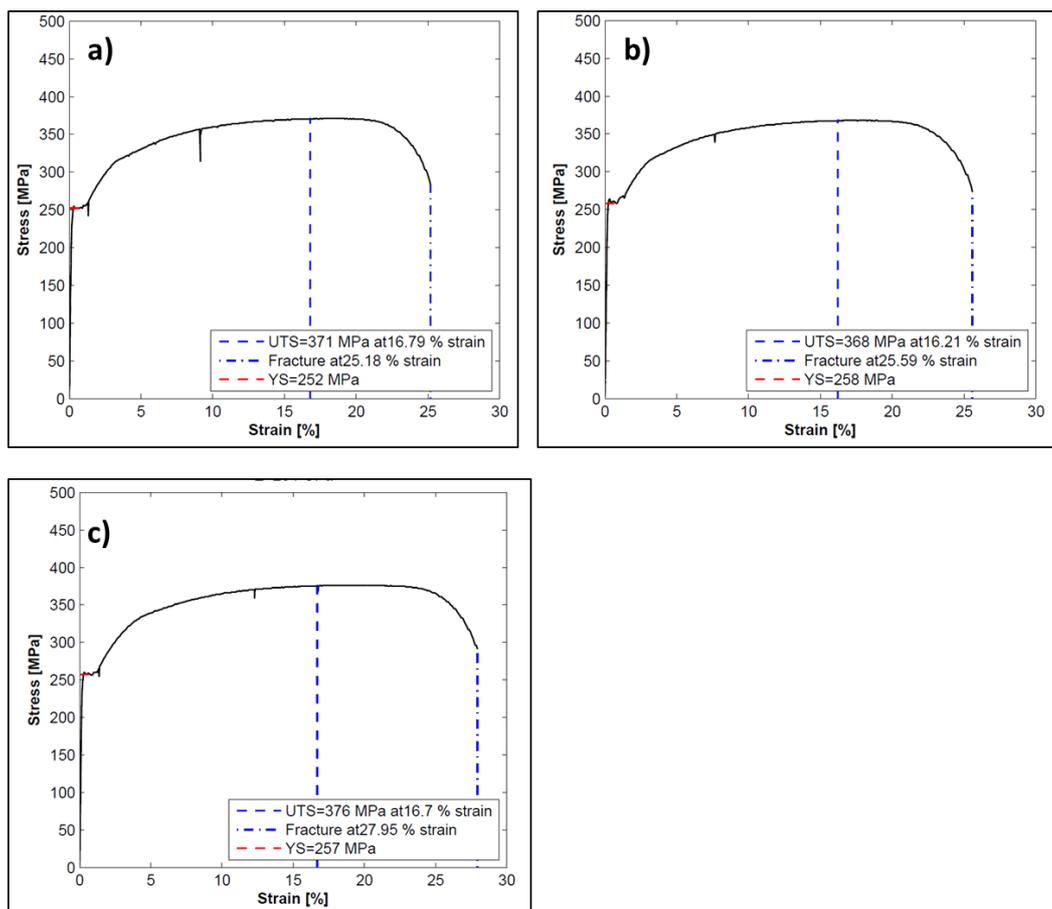


Figura 9. Propiedades de Tracción obtenidas con DIC para las muestras de acero A36 con recubrimiento de Nanosteel: (a) CM-01, (b) CM-02 y (c) CM-02

En la tabla 8 se listan las propiedades de tracción del material determinadas con la técnica DIC.

Tabla 8. Propiedades mecánicas del acero A36 con recubrimiento de Nanosteel obtenidas con aplicación de DIC

Especímenes	Esfuerzo de fluencia [MPa]	Esfuerzo último [MPa]	Deformación [%]
CM-01	286	434	25
CM-02	258	368	25.59
CM-03	247	376	27.95

Los resultados obtenidos para el acero A36 con recubrimiento de Nanosteel, demuestran que el material incrementó la ductilidad y disminuye su resistente mecánica respecto al material base (acero A36). El módulo de elasticidad del material con recubrimiento disminuyó en 20% con respecto al material sin recubrimiento. Al disminuir el

módulo de elasticidad, la deformación elástica del material que se origina cuando se aplica una determinada tensión disminuye; es decir, la resistencia a la deformación plástica decrece (Callister & Rethwisch, 2009), por lo tanto, el material se vuelve más dúctil.

De igual manera, el esfuerzo de fluencia y el esfuerzo último de tracción para el material recubierto con respecto al material base, disminuye en un 9.82% y 11.52% respectivamente. La disminución del esfuerzo de fluencia y el esfuerzo último está relacionado directamente con el cambio de área de la sección transversal de los materiales experimentados; esto se debe, a que el valor del esfuerzo es inversamente proporcional al valor del área (Beer & Johnston, 1993). El incremento de área transversal del material con recubrimiento con respecto al material base es del 13%, lo que ocasiona una disminución en los esfuerzos citados anteriormente, como se puede observar en la tabla 6 y 8 y en la figura 10. Por otra parte, la disminución del esfuerzo de fluencia indica una disminución de la resistencia a la deformación plástica del material (Callister & Rethwisch, 2009), lo que ocasionaría que el material se vuelva más dúctil.

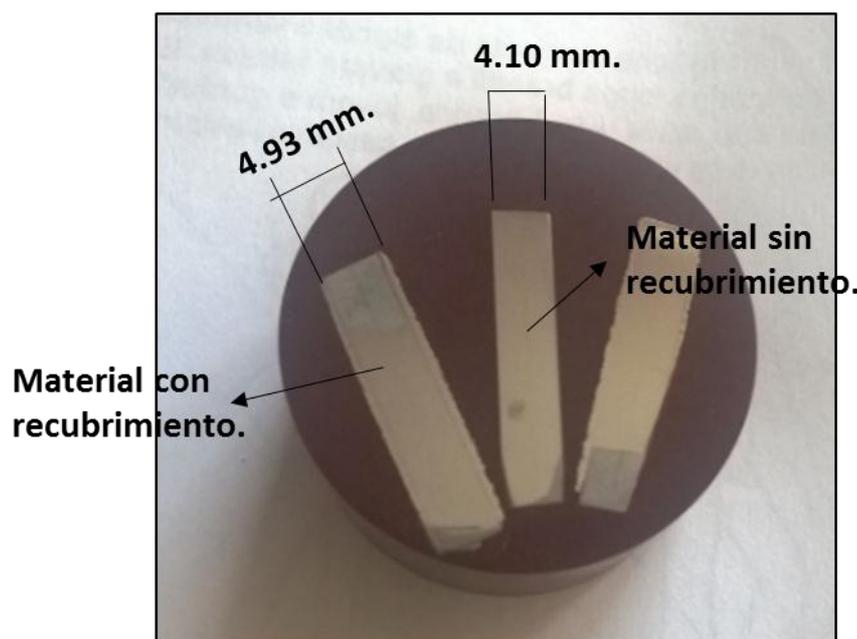


Figura 10. Diferencia de espesor entre la probeta con y sin recubrimiento

Asimismo, el material con recubrimiento sufre una mayor deformación plástica, elevándose la misma en un valor 2.5%. Valor que indica un aumento en la ductilidad del material. (Callister & Rethwisch, 2009) .

Lo expuesto anteriormente se puede visualizar en la figura 11 y tabla 9, donde se compara visualmente y cuantitativamente, el estado final de las probetas con y sin recubrimiento, luego de ser retiradas de la máquina universal de tracción, observándose que a simple vista que la probeta con recubrimiento es 2.7 mm más larga que la que no tiene recubrimiento, considerando que de acuerdo con los registros de verificación dimensional del anexo A, todas las probetas registraron iguales valores para longitud inicial.

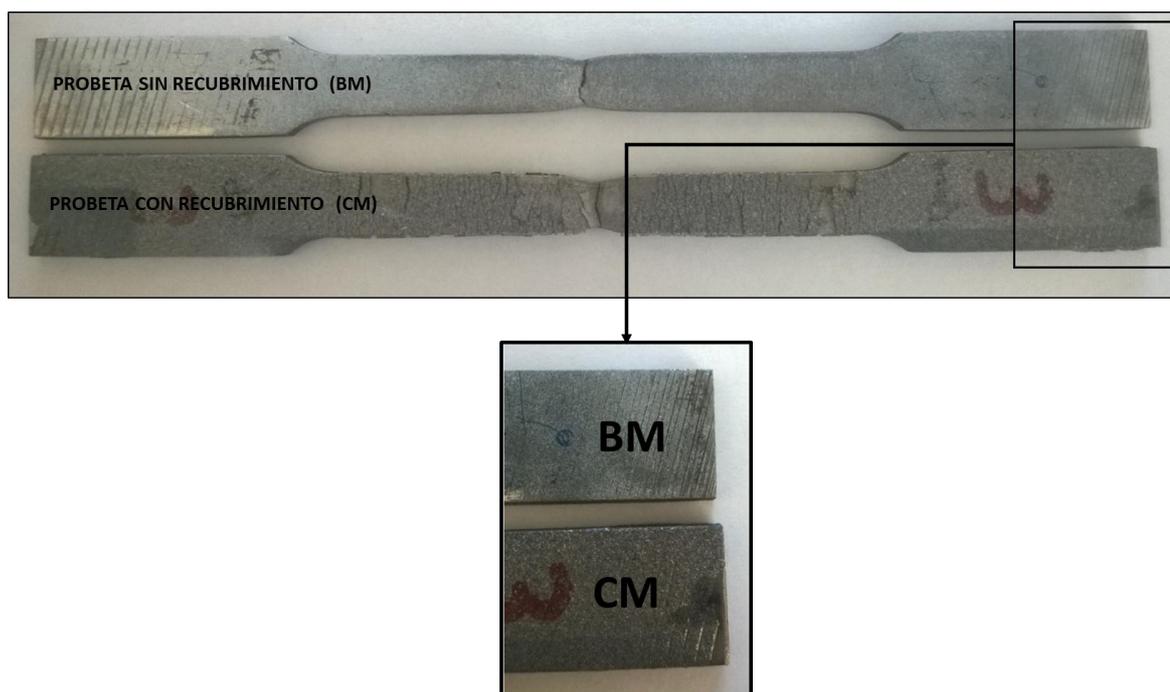


Figura 11. Comparación de longitudes finales de la probeta de acero con y sin recubrimiento

Tabla 9. Comparación cuantitativa de la muestra BM y CM de la figura 10

Especímenes	Valor inicial longitud total [mm]	Valor final longitud total [mm]	Elongamiento porcentual [%]
BM	200.5	223.3	11.37
CM	200.5	226	12.71

Con los resultados de la tabla 9, es posible aseverar que el material con recubrimiento se volvió más dúctil, debido a que la diferencia entre los valores finales de longitud total de las probetas CM y BM, representa un incremento de 1.21% en la longitud total en la probeta con recubrimiento respecto a la sin recubrimiento. Asimismo en la tabla 9 se puede observar que la probeta con recubrimiento presenta un porcentaje de 12.71% de elongación respecto a su longitud original, mientras que la probeta de material sin recubrimiento tiene un porcentaje de 11.37% de elongación también respecto a su longitud original. Por lo tanto se puede considerar que la elongación porcentual permite cuantificar la ductilidad del material (Beer & Johnston, 1993).

Por otro parte, los mapas de deformación de las muestras de acero con recubrimiento que fueron obtenidos con el software VIC-2D, tal como se muestra en la figura 12, donde se observa el desplazamiento axial de la muestra en cuatro zonas de la curva de esfuerzo-deformación utilizando la técnica DIC.

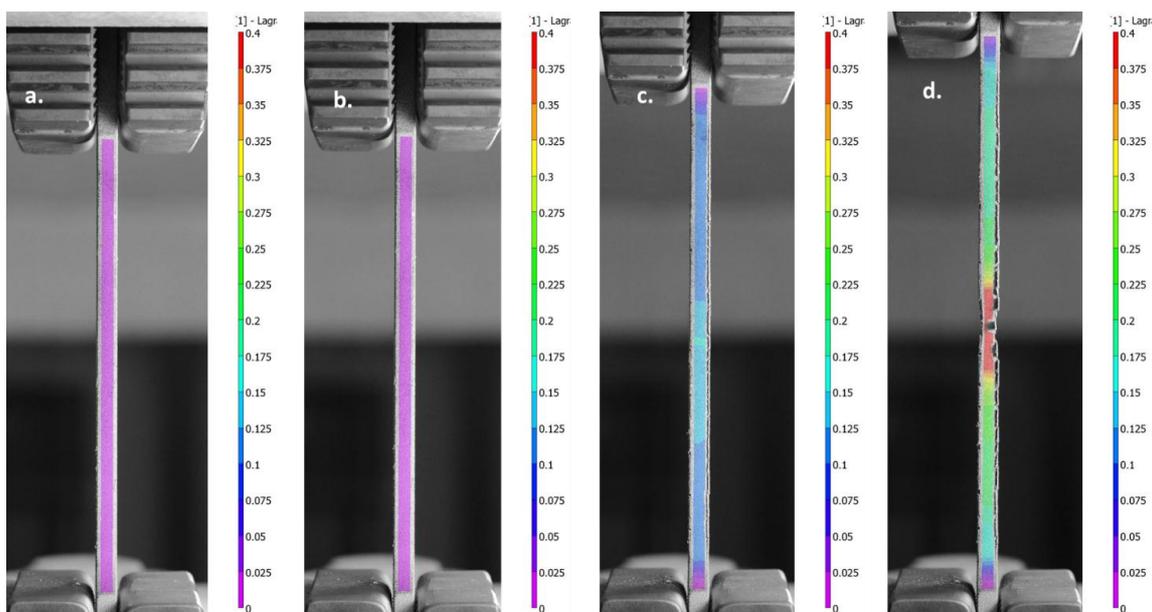


Figura 12. Mapa de deformación en la dirección axial para: (a) región elástica, (b) límite elástico, (c) esfuerzo último y (d) antes de la fractura

La figura 12 (a) ilustra la deformación unitaria del material en la zona elástica, deformación que es menor al 0.025 o deformación unitaria de la deformación total del material. Cuando el material entra en la zona plástica, el valor de deformación con respecto al esfuerzo último es menor al 20% de la deformación total, tal como se observa en la figura 12 (c). De igual manera, en la figura 12 (c), se puede observar el desprendimiento del recubrimiento del sustrato. Con la secuencias de imágenes obtenidas en el post-procesamiento, se logró identificar que el recubrimiento empieza a desprenderse del sustrato cuando la fuerza es de alrededor de 19100 N al tiempo de 7.83 minutos, correspondiente a la imagen número 94 de las 428 que abarcan el total análisis del ensayo.

La figura 12 (d) indica el comportamiento del material 5 segundos antes de su rotura. En esta imagen, se puede observar que la mayor deformación ocurre en la zona central de la probeta, con un valor aproximado de 0.4. Para observar con mayor detalle las deformaciones en la dirección axial de la muestra, se alteró la escala del análisis en un orden de 2.5% mayor que la escala original. (Ver figura 13)

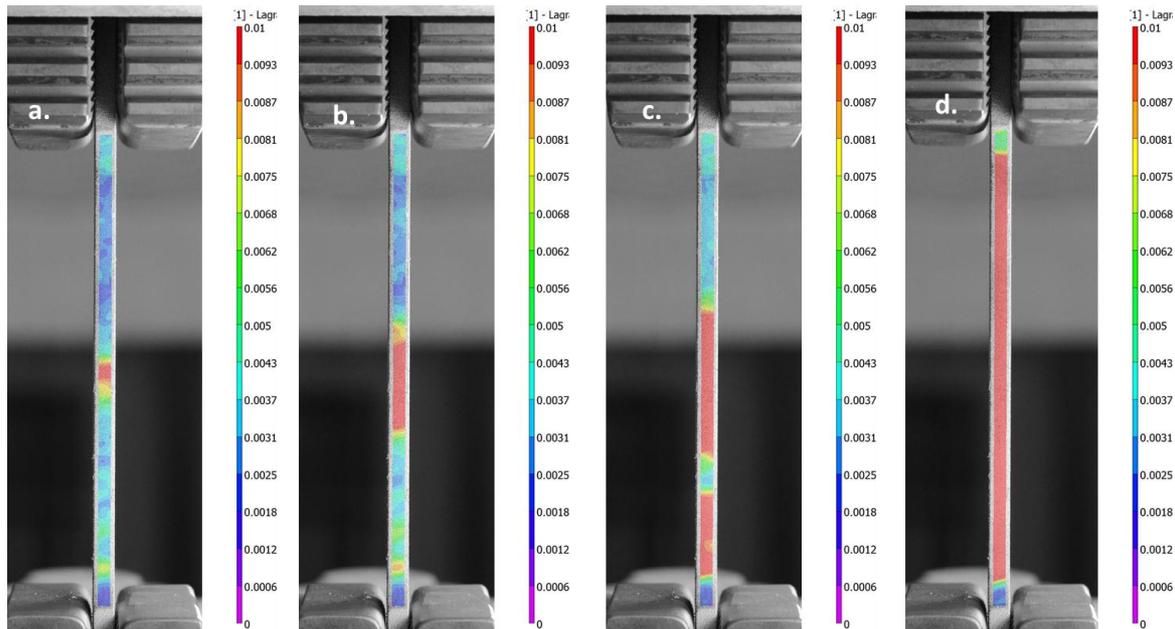


Figura 13. Mapa de deformación en la dirección axial en escala 2.5% mayor a la escala original para: (a) Límite elástico, (b) Inicio de la zona de bandas de Lüders (c) durante la zona de bandas de Lüders, (d) Final de la zona de las bandas de Lüders.

La figura 13 (a) muestra un incremento en la deformación unitaria en la zona central de la probeta, con un valor aproximado al 0.01. Realizando una comparación entre las figuras 13 (a) y 12 (d), la zona donde el encuellamiento se formó, corresponde al punto de máxima deformación cuando la muestra se encuentra en su límite elástico, tal como sucedió en la muestra de acero A36 sin recubrimiento. De igual manera, el fenómeno de discontinuidad del punto de fluencia sigue el mismo patrón del acero A36 sin recubrimiento mostrado en la figura 8.

Por lo tanto, se corrobora que la técnica DIC puede predecir el lugar donde el material va a fallar, ya sea en el caso de un material con o sin recubrimiento, sin necesidad de entrar netamente en la zona de deformación plástica.

Por otra parte, al no contar con información teórica (ficha técnica) de las propiedades mecánicas del acero A36 con el recubrimiento de Nanosteel, especialmente del

comportamiento elástico del material, debido a que es información confidencial del proveedor de este tipo de proceso; se procedió a comparar los resultados de la técnica DIC con los datos recolectados con el extensómetro de la máquina de tracción. Los resultados obtenidos se muestran en la tabla 10.

Tabla 10. Módulo de elasticidad obtenido con DIC y extensómetro

Especímenes	Módulo de elasticidad con DIC [GPa]	Módulo de elasticidad con extensómetro [GPa]
CM-01	165.8	268.9
CM-02	151	261.1
CM-03	168.8	284.7
Media	161.86	271.5

En la tabla 10, se observa una diferencia de 109.7 [GPa] entre la media del módulo de elasticidad obtenido con la técnica DIC y el extensómetro, valor que es representativo. Por lo tanto, se procedió a realizar un nuevo ensayo, para verificar el patrón de datos obtenidos en la tabla 10 para las dos técnicas. Para esta prueba, con el propósito de validar los resultados obtenidos anteriormente con el empleo del programa VIC-2D, se usó el módulo de Matlab Ncorr v1.2. Como el programa Ncorr v1.2 es de fuente abierta, la utilización del mismo se describe en el anexo C; asimismo en el anexo D se explica el procedimiento para extraer los datos de deformación de las probetas, a través del procesamiento de las imágenes capturadas durante el desarrollo de este tipo de experimento. Los valores obtenidos para el módulo de elasticidad con el uso del programa Ncorr v1.2, se detalla en la tabla 11.

Tabla 11. Módulo de elasticidad calculado con Ncorr

Especimen	Módulo de elasticidad con DIC [GPa]	Módulo de elasticidad con extensómetro [GPa]
CM-04	154.6	269.7

El valor calculado para el módulo de elasticidad con la técnica DIC es de 154.6 [GPa], valor que se encuentra cercano a los valores de módulo de elasticidad obtenidos con el programa VIC-2D de la tabla 10.

Para entender los valores con el extensómetro obtenidos en la tabla 10 y 11, se realizó una gráfica esfuerzo-deformación con los dos materiales usados a lo largo de este trabajo, con los datos de la técnica DIC y con los datos de la máquina de tracción, tal como se observa en la figura 14.

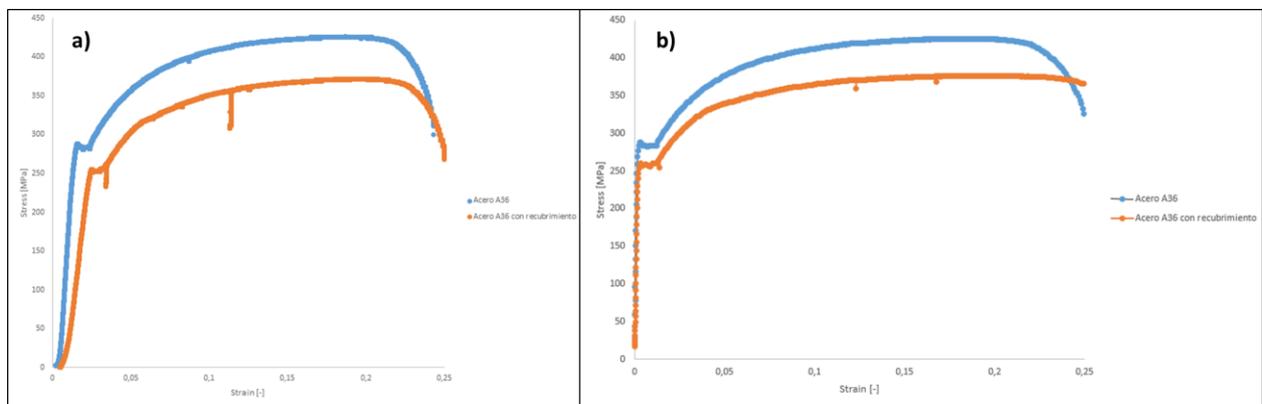


Figura 14. Curva esfuerzo-deformación para muestra con recubrimiento: (a) máquina de tracción y (b) técnica DIC

En la figura 14 (a) y 14 (b), se observa que la pendiente del material con recubrimiento es menor a la pendiente de acero A36. Como el módulo de elasticidad corresponde a la pendiente del segmento lineal de la zona elástica (Callister & Rethwisch, 2009), se verifica que la pendiente del material con recubrimiento es menor en comparación a la pendiente del acero A36 sin recubrimiento; por lo tanto, los valores calculados con la técnica DIC tienen consistencia.

La diferencia entre los valores calculados con la técnica DIC y el extensómetro, podría deberse a las siguientes causas:

- Problema de agarre de las mordazas a la probeta debido a la rugosidad presente en las muestras. Esto se comprobó mientras se realizaban los ensayos, debido que las mordazas no sujetaban correctamente las probetas, provocando que automáticamente el software de la máquina universal en varias ocasiones cancele las pruebas en proceso.
- Problemas de adherencia entre el recubrimiento y el sustrato. En la figura 15, se puede observar una micrografía de las zonas donde se colocó el recubrimiento, donde se puede verificar que existen zonas como buena adherencia del recubrimiento y también otras zonas que evidencian una falta de adherencia de este recubrimiento sobre el sustrato. Al no tener una consolidación perfecta entre el recubrimiento y el sustrato, durante la aplicación de una carga axial, se puede perder la sujeción de las mordazas, lo cual puede influir en la medición realizada por el extensómetro (INEN, 2009).

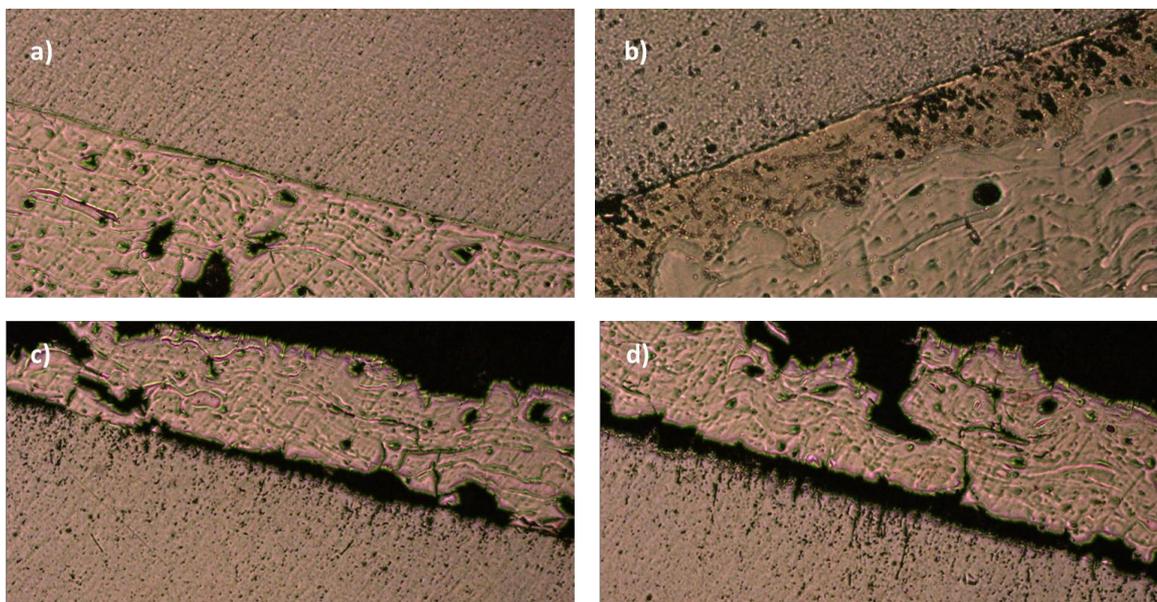


Figura 15. Micrografías 100X del límite del sustrato con recubrimiento, (a) y (b) buena adherencia (c) y (d) adherencia deficiente

Las causas mencionadas anteriormente por el momento están en el ámbito de hipótesis, por lo tanto en una siguiente fase de desarrollo o profundización del empleo de la técnica DIC, será necesario realizar nuevos ensayos con muestras de acero A36 con recubrimiento de Nanosteel, a fin de lograr consistencia de los resultados que se obtengan en pruebas de este tipo de materiales, mediante el empleo del extensómetro de la máquina universal; identificando así cuales serían las causas que generan la discrepancia evidenciada en este trabajo entre los dos métodos de medición.

CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

A través del desarrollo de este trabajo de titulación, el método DIC fue comprendido y recreado de manera exitosa para un ensayo de tracción. Se consiguió instalar una plataforma de ensayos para la técnica DIC con los instrumentos de laboratorio. De igual forma, se logró realizar un correcto patrón “speckle” para el post-procesamiento de las imágenes empleando el software VIC-2D u otro software de similares capacidades como Ncorr v1.2, para el segundo inclusive se realizó la programación en Matlab para la extraer los datos de deformación de los especímenes de prueba.

La técnica fue validada calculando el módulo de Young de un acero A36, para el cual se obtuvo un porcentaje de error del 4.5% con respecto a los datos teóricos del acero A36, con un coeficiente de correlación del 99.8%. De igual manera, se comparó los datos del módulo de elasticidad obtenidos con la técnica DIC con los del extensómetro, siendo la técnica DIC más precisa para las condiciones ambientales del laboratorio. Esto se debe, a que la técnica DIC no necesita una calibración de los instrumentos con patrones físicos, sino que la calibración de los equipos se realiza de forma automática vía software. Mientras que, los instrumentos convencionales del laboratorio, necesariamente requieren una calibración periódica comparativa con patrones físicos trazables a un laboratorio de metrología específico (ISO/IEC 17025, 2005). En tal virtud, se determinó que el método DIC es de alta precisión, considerando las ventajas de un montaje sencillo, simple y económico, con baja vulnerabilidad ambiental, y procesamiento automático de datos.

Las propiedades mecánicas del acero A36 se obtuvieron con la técnica DIC, como se mostró en la tabla 5. Las propiedades encontradas tuvieron un porcentaje de error del 14.08% y 10.17% para el esfuerzo de fluencia y deformación, respectivamente. Los datos del

esfuerzo último estuvieron dentro del rango de los datos teóricos. Consecuentemente, la precisión de la técnica DIC se confirmó nuevamente.

La técnica DIC demostró un gran potencial para realizar las medidas de las propiedades mecánicas mediante la creación de un diagrama esfuerzo-deformación de un acero A36 recubierto con Nanosteel. Los resultados fueron 168 [GPa] para el módulo de Young, 376 [MPa] para el esfuerzo último de tracción y 27.95% para la deformación total. Por lo tanto, la técnica DIC fue exitosamente aplicada para la medición de las propiedades mecánicas para materiales que han sido sometidos a procesos especiales para mejorar alguna de sus propiedades.

Los mapas de deformación de acero A36 con y sin recubrimiento, permitió identificar visualmente indicios de la zona de iniciación del encuellamiento en la región elástica, lo cual es casi imposible de conseguir con el ensayo tradicional de tracción. Asimismo, se detectó indicios de que el fenómeno de discontinuidad del punto de fluencia, inicia en la zona con mayor deformación al superar el límite elástico del material de prueba. A fin de confirmar la consistencia de estos hallazgos, es recomendable que se realicen pruebas exhaustivas sobre este tema cuando se implemente la técnica DIC en investigación.

Mediante este estudio, se ha demostrado la versatilidad de la técnica DIC para ensayos de tracción dentro del campo de la mecánica experimental, de tal manera que a futuro sea posible emplear esta técnica de modo sistemático en nuevas investigaciones y progresivamente trasladar el uso de esta técnica al campo de la creciente industria siderúrgica nacional y también de otras industrias que elaboran o emplean materiales metálicos y no metálicos en sus procesos productivos, tal como la industria metal-mecánica, petrolera, de la construcción, entre otras.

Finalmente, este trabajo puede ser considerado como insumo para investigaciones de mayor alcance en la carrera de ingeniería mecánica de la USFQ, para lo cual es recomendable mejorar las condiciones ambientales del laboratorio y la capacidad de los equipos e instrumentos a ser empleados, de igual manera será necesario contar con un software de procesamiento de imágenes para uso permanente.

REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

ASTM. (s.d.). ASTM E8/E8M. Standard Test Methods for Tension Testing of Metallic Materials. *ASTM International*.

Beer, F., & Johnston, R. (1993). *Mecánica de Materiales*. Colombia: McGraw Hill.

Bing, P., Hui-min, X., Tao, H., & Asundi, A. (2009). Measurement of coefficient of thermal expansion of films using digital image correlation method. *Polymer Testing*, 75-83.

Callister, W., & Rethwisch, D. (2009). *Materials Science and Engineering An Introduction*. United States of America: Wiley.

Canal, L., Molina, J., Gonzáles, C., Segurado, J., & Llorca, J. (s.d.). *MECANISMOS DE DEFORMACIÓN EN LAMINADOS DE MATRIZ POLIMÉRICA: CORRELACIÓN*. Madrid: 2Instituto Madrileño de Estudios Avanzados de Materiales (IMDEA-Materiales).

Data, M. M. (s.d.). *ASTM A36 Steel, plate*. Fonte:

<http://www.matweb.com/search/datasheet.aspx?matguid=afc003f4fb40465fa3df05129f0e88e6&ckck=1>

Davis, J. R. (2004). *Handbook of Thermal Spray Technology*. ASM International.

Eberl, C., Thompson, R., Gianola, D., Sharpe Jr, W., & Hemker, K. (27 de Septiembre de 2006). *Digital Image Correlation and Tracking*. Fonte:

<http://www.mathworks.com/matlabcentral/fileexchange/12413-digital-image-correlation-and-tracking>

Groover, M. (2008). *Fundamentals of Modern Manufacturing*. New York: Wiley.

Hadad, M., Marot, G., Démarécaux, P., Chicot, D., Lesage, J., Rohr, L., & Siegmann, S. (2007).

Adhesion tests for thermal spray coatings: correlation of bond strength and interfacial toughness. *Surface Engineering*, 279-283.

- INEN, N. T. (2009). *ENSAYO DE TRACCION PARA MATERIALES METALICOS A TEMPERATURA AMBIENTE*. Quito.
- ISO/IEC 17025, I. S. (2005). *General requirements for the competence of testing and calibration laboratories*. Genova, Suiza.
- Kuroda, S., & Clyne, T. (1991). The quenching stress in thermally sprayed coatings. *Thin Solid Films*, 49-66.
- López, E., Díaz, F., Dorado, R., & López Garcia, R. (2010). *Análisis de deformaciones en probetas planas mediante correlación digital de imágenes*. Asociación Española de Ingeniería Mecánica.
- Marín Villar, C. (s.d.). Thermal Spray: Protección de alto impacto. *Metal Actual*, 40-45.
- Pereyra, C. A. (s.d.). *CONTROL DE CALIDAD DE PELÍCULAS DE PINTURAS*. Fuente:
<http://www.frlp.utn.edu.ar/materias/protecmat/calidad.pdf>
- Publishing, N. U. (s.d.). *Steels*. Fuente:
<https://www.staff.ncl.ac.uk/s.j.bull/mmm211/STEEL/sld007.htm>
- Schwab, R., & Ruff, V. (2013). On the nature of the yield point phenomenon. *ELSEVIER*, 1798-1808.
- Sesé, L. F., Díaz, F., & Dorado, R. (s.d.). *Comparativa de técnicas de filtrado de imágenes para el procesado conjunto de las técnicas de Correlación Digital de Imágenes 2D y Proyección de Franjas*. Asociación Española de.
- SPRAY, R. P. (2009). *Pagnola, Marcelo*. Buenos Aires: Universidad de Buenos Aires, ResearchGate.
- Taylor, R., Brandon, J., & Morrell, P. (1992). Microstructure, composition and property relationships of plasmasprayed. *Surface and Coatings Technology*, 141-149.

VIC-2D Reference Manual. (s.d.). Fonte: Solutions, Correlated:

<http://www.correlatedsolutions.com/installs/Vic-2D-2009-Manual.pdf>

Wang, Y. H., Jiang, J. H., Wanintrudal, C. D., Zhou, D., Smith, L. M., & Yang, L. (2010). Whole field sheet-metal tensile test using digital image correlation. *Techniques*, 54-59.

Wang, Y., & Tong, W. (2013). A high resolution DIC technique for measuring small thermal expansion of film specimens. *Optics and Lasers in Engineering*, 30-33.

ANEXO A

REGISTRO DE CONTROL DIMENSIONAL DE LAS PROBETAS

Muestras de acero A36.

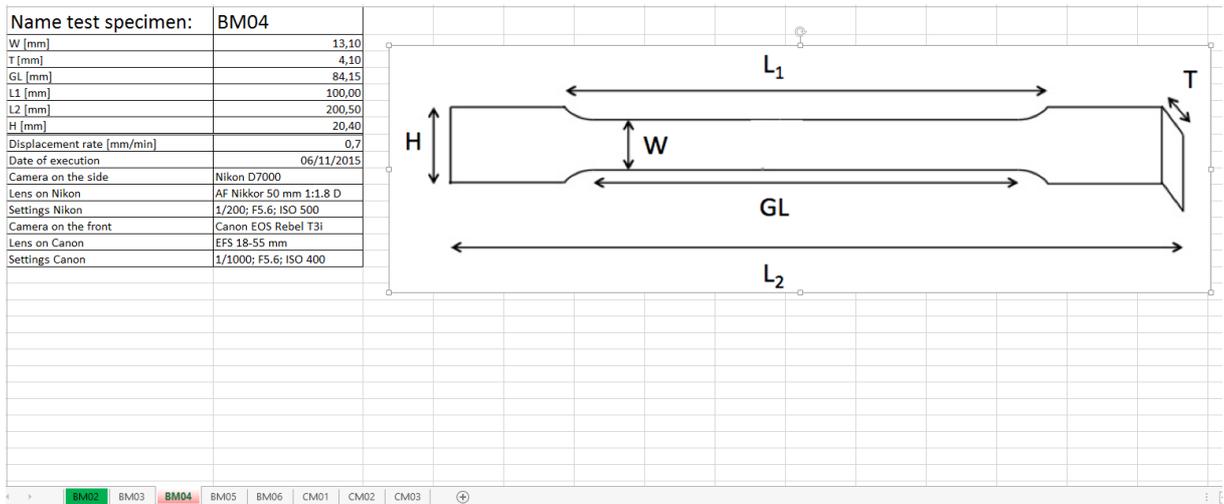
BM_02

A	B	C	D	E	F	G	H	I	J	K	L	M	N
Name test specimen:	BM02												
W [mm]	13,10												
T [mm]	4,00												
GL [mm]	84,15												
L1 [mm]	100,00												
L2 [mm]	200,50												
H [mm]	20,40												
Displacement rate [mm/min]	0,7												
Date of execution	04/11/2015												
Camera on the side	Nikon D7000												
Lens on Nikon	AF Nikkor 50 mm 1:1.8 D												
Settings Nikon													
Camera on the front	Canon EOS Rebel T3i												
Lens on Canon	EF 18-55 mm												
Settings Canon	1/640; F5.6; ISO 400												

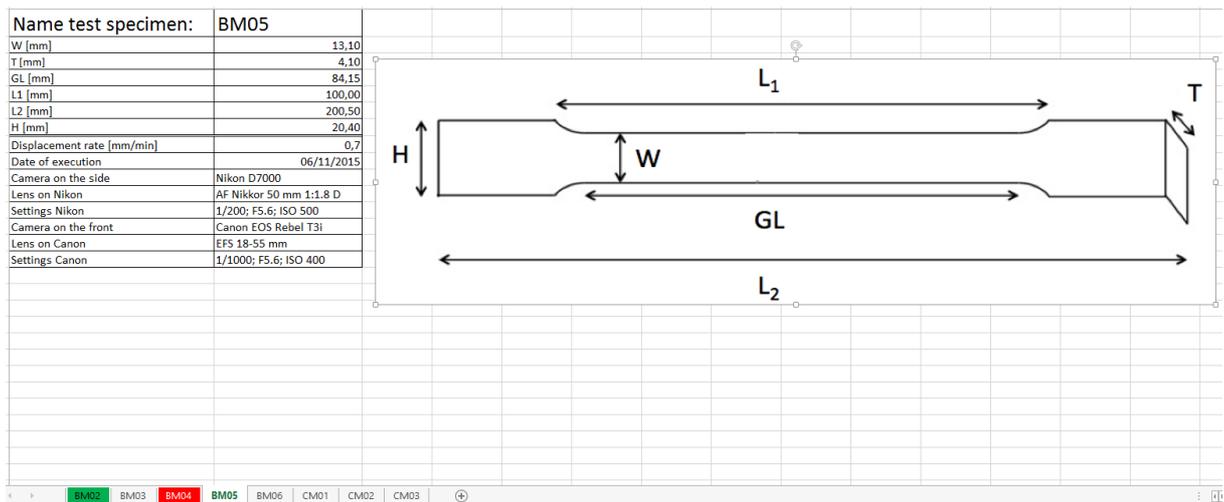
BM_03

A	B	C	D	E	F	G	H	I	J	K	L	M	N
Name test specimen:	BM03												
W [mm]	13,10												
T [mm]	4,05												
GL [mm]	84,15												
L1 [mm]	100,00												
L2 [mm]	200,50												
H [mm]	20,40												
Displacement rate [mm/min]	0,7												
Date of execution	04/11/2015												
Camera on the side	Nikon D7000												
Lens on Nikon	AF Nikkor 50 mm 1:1.8 D												
Settings Nikon													
Camera on the front	Canon EOS Rebel T3i												
Lens on Canon	EF 18-55 mm												
Settings Canon	1/640; F5.6; ISO 400												

BM_04



BM_05



BM_06

Name test specimen	BM06
W [mm]	13,10
T [mm]	4,00
GL [mm]	84,15
L1 [mm]	100,00
L2 [mm]	200,50
H [mm]	20,40
Displacement rate [mm/min]	0,7
Date of execution	07/11/2015
Camera on the side	Nikon D7000
Lens on Nikon	AF Nikkor 50 mm 1:1.8 D
Settings Nikon	1/200; F5.6; ISO 500
Camera on the front	Canon EOS Rebel T3i
Lens on Canon	EFS 18-55 mm
Settings Canon	1/1000; F5.6; ISO 400

The diagram shows a long, thin specimen with a central section of width W and length GL . The total length is L_1 , and the distance from the end to the start of the central section is L_2 . The thickness is H and the width of the end section is T .

Muestras de A36 con recubrimiento

CM_01

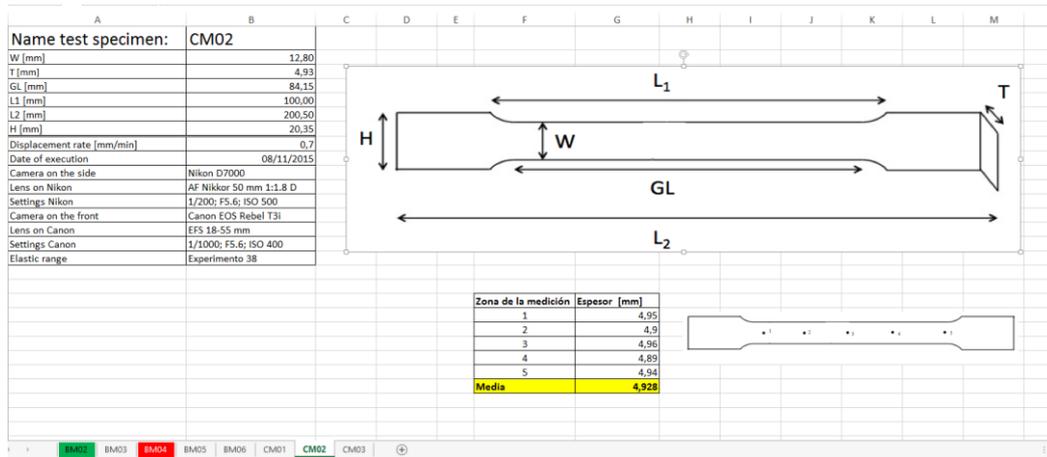
Name test specimen:	CM01
W [mm]	13,10
T [mm]	4,66
GL [mm]	84,15
L1 [mm]	100,00
L2 [mm]	200,50
H [mm]	20,55
Displacement rate [mm/min]	0,7
Date of execution	08/11/2015
Camera on the side	Nikon D7000
Lens on Nikon	AF Nikkor 50 mm 1:1.8 D
Settings Nikon	1/200; F5.6; ISO 500
Camera on the front	Canon EOS Rebel T3i
Lens on Canon	EFS 18-55 mm
Settings Canon	1/1000; F5.6; ISO 400
Elastic range	Experimento 35, 36

The diagram shows a specimen similar to BM06 but with a thickness H of 20,55 mm. It includes the same dimension labels: L_1 , L_2 , W , GL , and T .

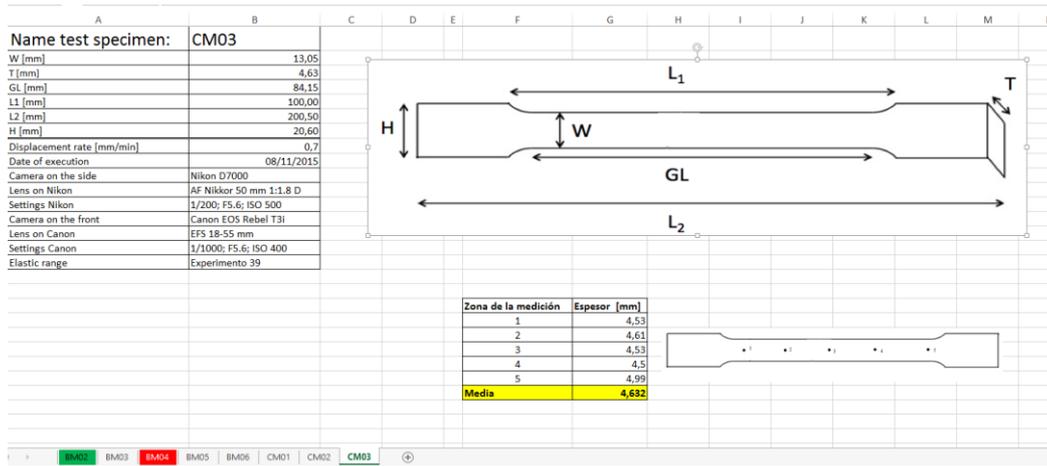
Zona de la medición	Espesor [mm]
1	4,7
2	4,69
3	4,66
4	4,62
5	4,63
Media	4,66

A small diagram shows five measurement points (1-5) along the width of the specimen, corresponding to the thickness measurements in the table above.

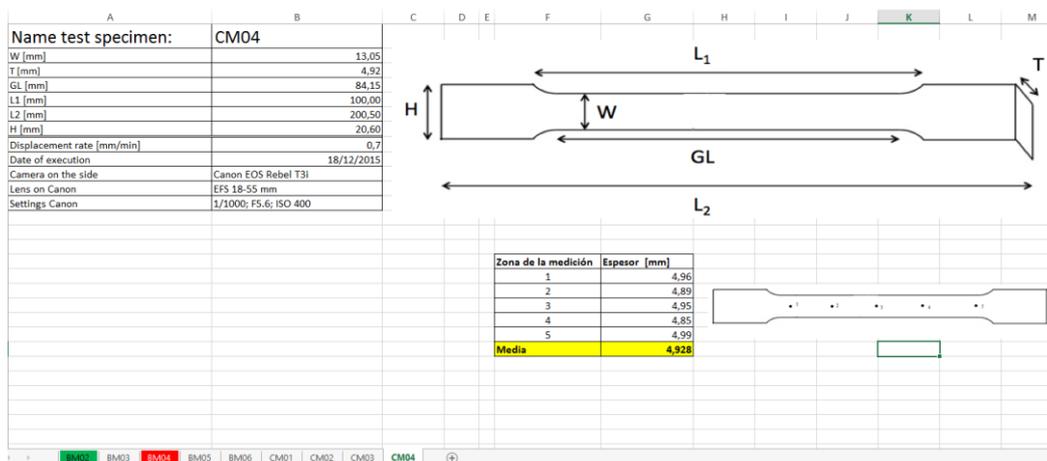
CM_02



CM_03



CM_04



ANEXO B

CONFIGURACIÓN DE LA MÁQUINA DE ENSAYOS UNIVERSAL Y SU SOFTWARE.

Antes de proceder con el montaje de la probeta en la máquina de ensayos universal, es necesario realizar los siguientes pasos:

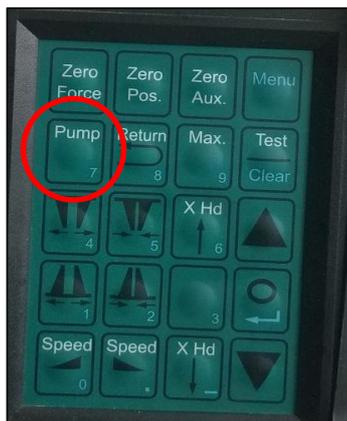
1. Encender la computadora.
2. Encender la máquina con el interruptor manual ubicado en la parte lateral derecha de la máquina de tracción.



3. Una vez encendida la máquina, esperar que aparezca en la pantalla del panel de control "602 Machine Home", tal como se observa en la figura 4.



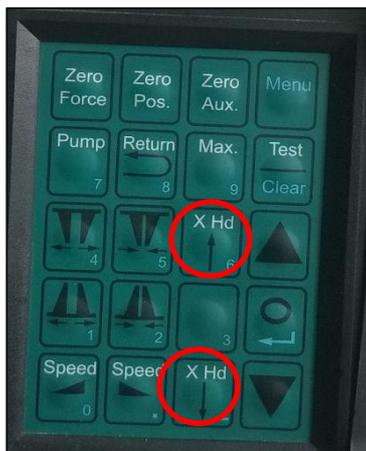
4. Presionar "Pump" (7) en el panel de control.



5. Presionar "Return" (8) en el panel de control.



- a. Esperar hasta que la cabeza del pistón alcance la distancia de separación de 11.466 mm. y que este valor aparezca en la esquina inferior izquierda de la pantalla del panel de control.
- b. Después de esto, mover el pistón inferior con la tecla X Hd (flechas arriba y abajo) en el panel de control. Durante el ensayo de tracción solamente la cabeza superior del pistón se desplazará.

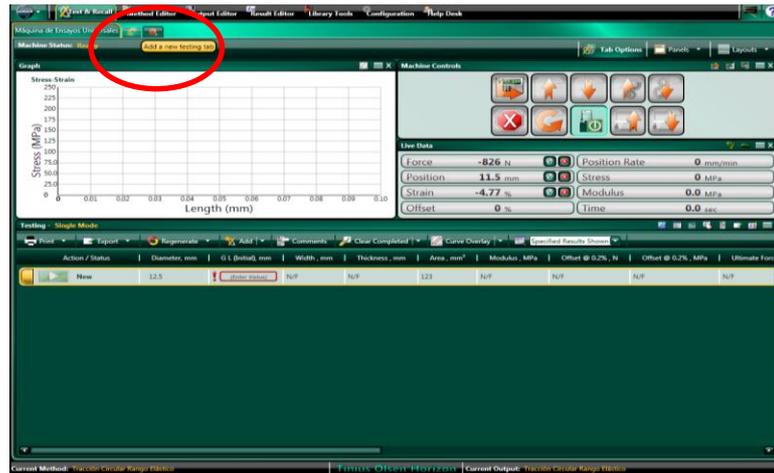


6. Presionar la tecla “Zero Position” antes de colocar las mordazas en el mandril.



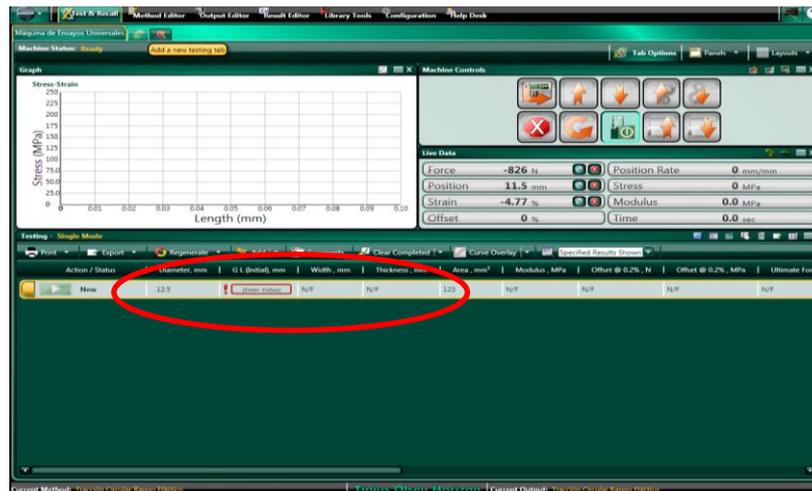
Antes de colocar las mordazas y la pieza en la máquina de tracción, primero se debe configurar el software del equipo, tal como se muestra a continuación:

7. Iniciar el programa Horizon, ubicado en el escritorio de la computadora.
8. Una vez inicializado el programa no considerar la ventana que aparece por default sino proceder a abrir una nueva pestaña de pruebas.



Una vez generada la ventana para el ensayo respectivo, ejecutar los siguientes pasos:

- a. En fuente de la máquina seleccionar: Máquina de Ensayos Universales.
- b. En método seleccionar: Tracción probeta plana.
- c. Los demás parámetros se mantienen sin cambios.
- d. Una vez establecidos los parámetros, aparecerá una ventana de aviso, presionar OK, luego de lo cual se visualizará la ventana generada por default pero cargados los datos reales.
- e. Verificar que los datos reales cargados en el software: fuerza, posición, desplazamiento de tensión coincidan con los cargados en el panel de control; si no es así, repetir los pasos del enunciado 8 hasta que tales valores coincidan entre sí.
- f. Ingresar en la ventana activa del software las variables de espesor, ancho y longitud de referencia (Gauge length GL). Si se utiliza el extensómetro, GL será igual a 50 mm.



Montaje de la probeta plana en la máquina de tracción.

Una vez configurada la máquina de tracción y el software de dicha máquina, se procede a realizar el montaje de las muestras planas en la máquina de tracción de la siguiente manera:

1. Medir las dimensiones de las probetas con un calibrador.
2. Seleccionar las mordazas adecuadas e instalarlas en el mandril superior e inferior de la máquina de tracción.
3. Colocar dos placas espaciadoras junto con la mordaza seleccionada en el mandril superior.



4. Colocar cuatro placas espaciadoras junto con la mordaza seleccionada en el mandril inferior.



5. Ajustar la mordaza con la palanca de apriete del mandril superior para sujetar totalmente el extremo superior de la probeta de ensayo, luego fijar completamente la mordaza y la pieza en el mandril con la respectiva palanca de apriete.
6. Subir el mandril inferior hasta sujetar totalmente el extremo inferior de la probeta y fijar la mordaza inferior con la respectiva palanca de apriete de este conjunto mecánico.
7. Verificar que la muestra esté alineada utilizando un medidor de nivel.



ANEXO C

INSTRUCCIONES PARA EMPLEO DEL SOFTWARE “NCORR”

El programa alternativo que se puede utilizar para realizar la correlación digital de imágenes es el módulo 2D-DIC Matlab software Ncorr v1.2 (open source). El programa se puede descargar del siguiente link:

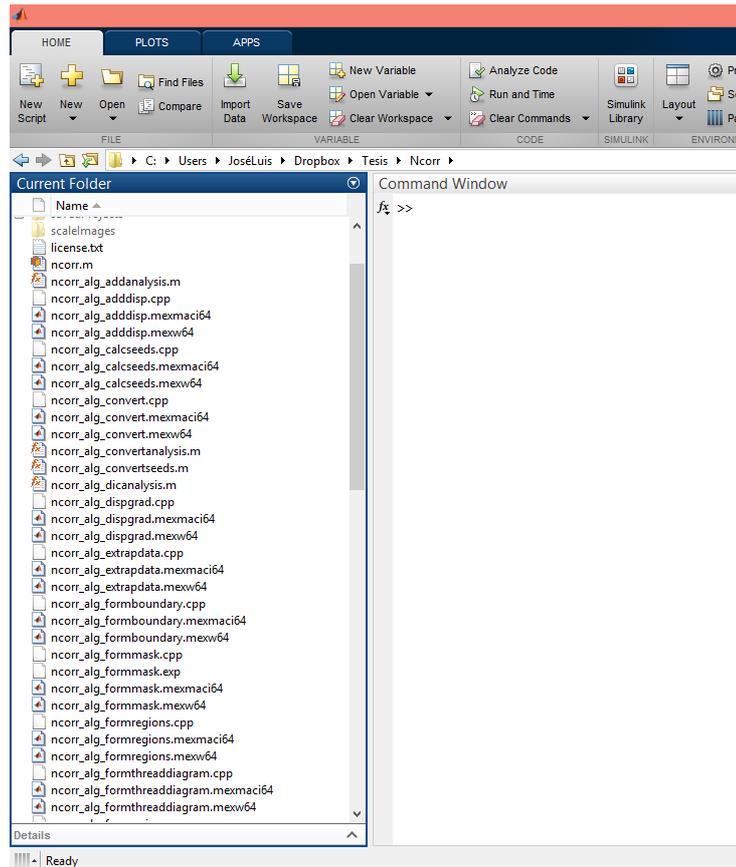
- <http://www.ncorr.com/index.php/downloads>

Requerimientos de instalación

- Requerimientos de la versión: Matlab R2009a+ o Matlab R2015a+.
- Requerimientos de la caja de herramientas: Image Processing Toolbox y Statistics Toolbox.
- Requerimientos del Sistema operativo: Window o Linux.
- Requerimientos del compilador.: Visual Studio 2008+ o GCC 4.2+

Instalación Automática

1. Abrir Matlab.
2. Abrir la carpeta donde se guardo la carpeta Ncorr.

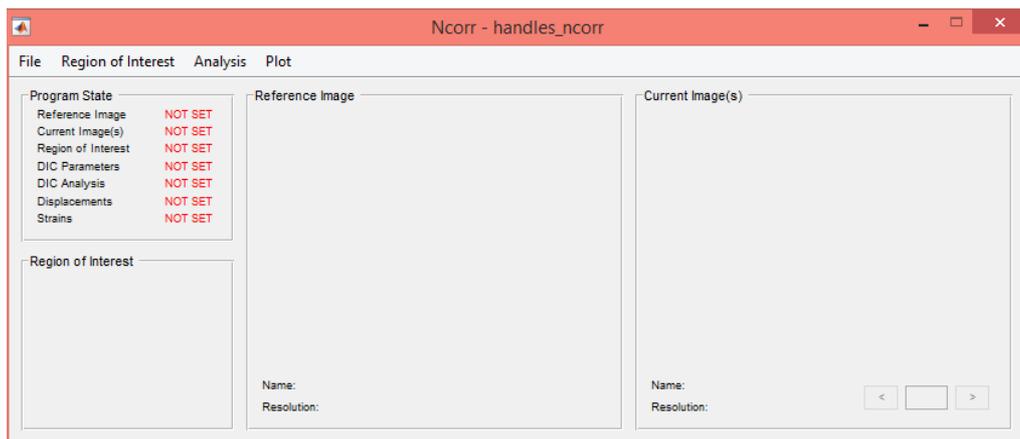


3. Escriba “handles_ncorr = ncorr” en la ventana de comandos de MATLAB



4. Una ventana de dialogo aparecerá. Presionar OK.

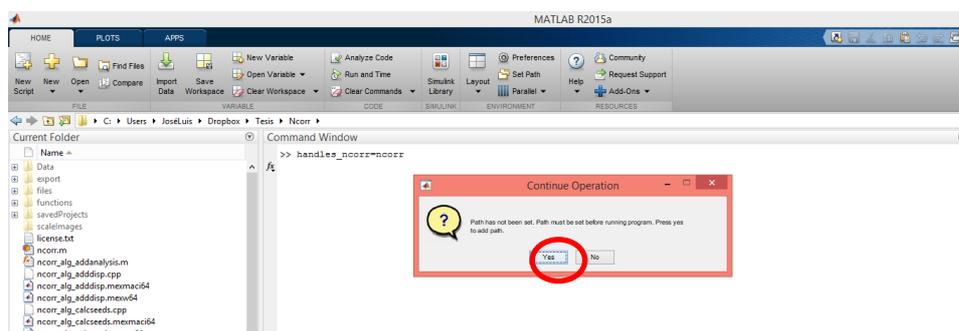
5. Un cuadro de dialogo de apoyo aparecerá. Hacer click en la opción de “OpenMP” si es que se dispone de un procesador de varios núcleos. Especificar el número de núcleos que posee el procesador de su computador en la opción de número de núcleos. Finalmente, si los archivos compilan apropiadamente, la ventana principal de el programa Ncorr aparecerá.



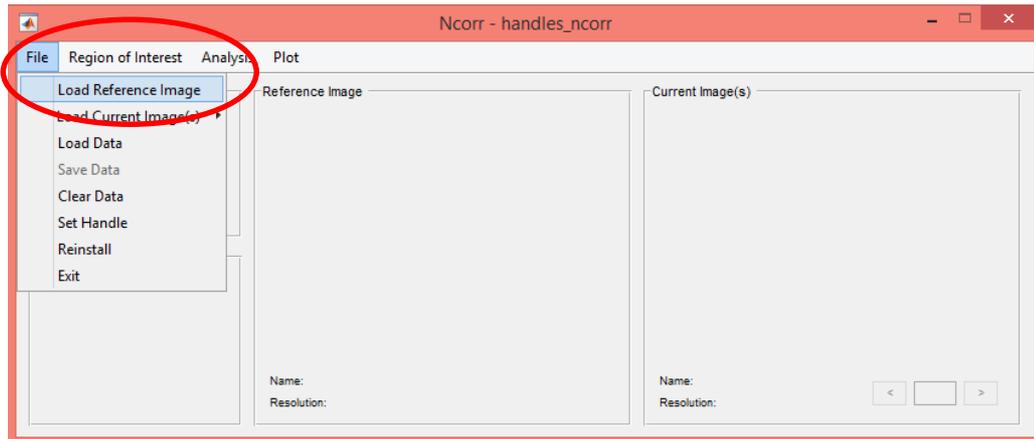
6. Mas detalles de la instalación del programa pueden ser encontrados en el siguiente link.<http://www.ncorr.com/index.php/downloads>

Guia de usuario del Software Ncorr.

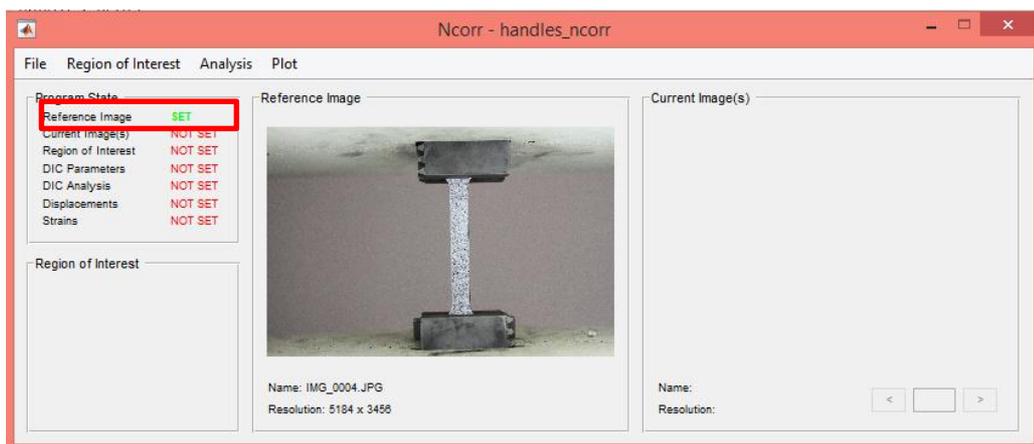
1. Antes de utilizar el programa, las imágenes que serán analizadas deben tener la siguiente extensión:
name_#.ext
2. Escribir "handles_ncorr = ncorr" en la ventana de comando de MATLAB
3. Presionar la opción 'yes' . .



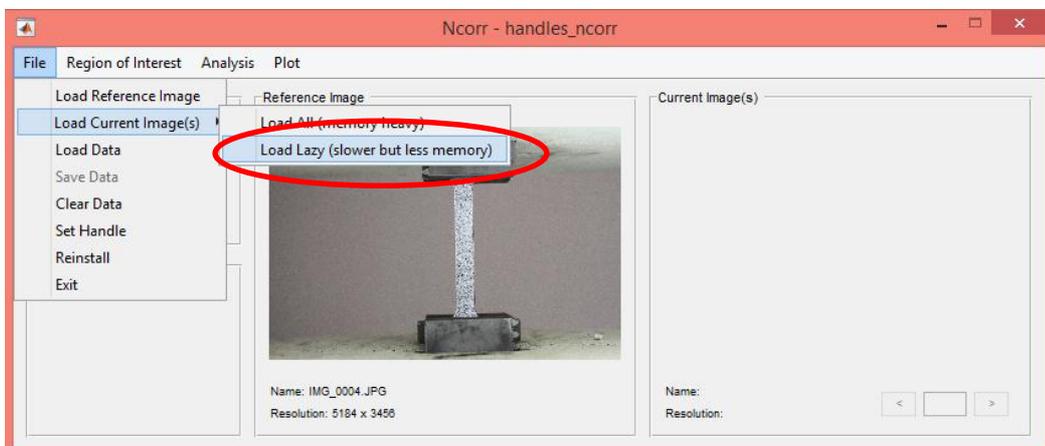
4. Ir a: File > Load Reference Image.



5. Seleccionar la imagen de referencia para el análisis. Cuando la imagen de referencia este cargada, la opción de "Reference Image" aparecerá la palabra SET de color verde.



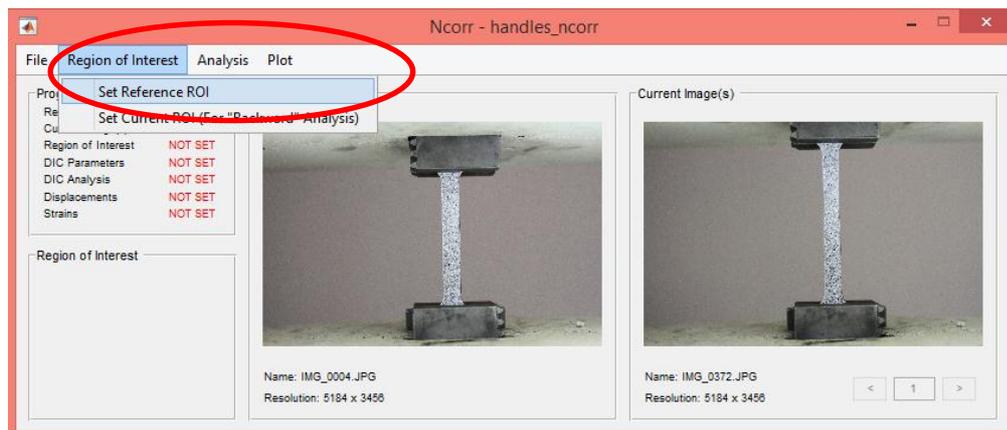
6. Ir a: File > Load current image(s). Seleccione las imágenes que serán analizadas.



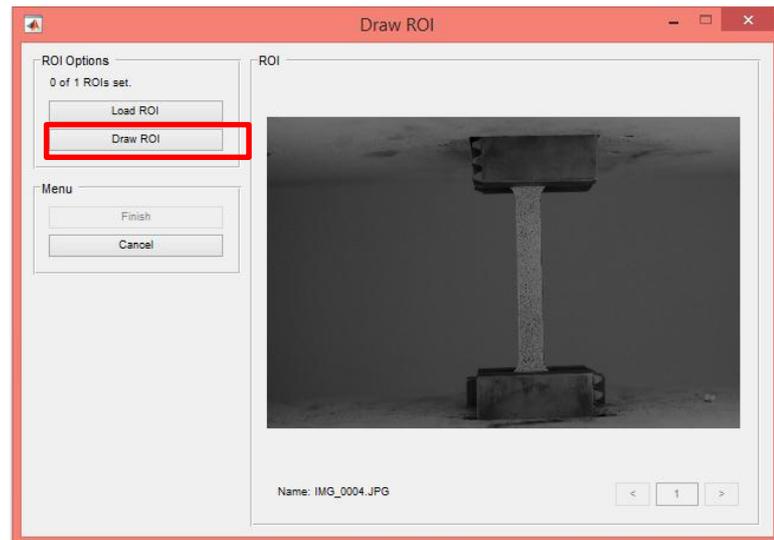
7. Aparecerá la ventana de selección de imágenes. Seleccione las imágenes que serán analizadas. Cuando las imágenes estén cargadas, la ventana deberá aparecer de la siguiente forma:



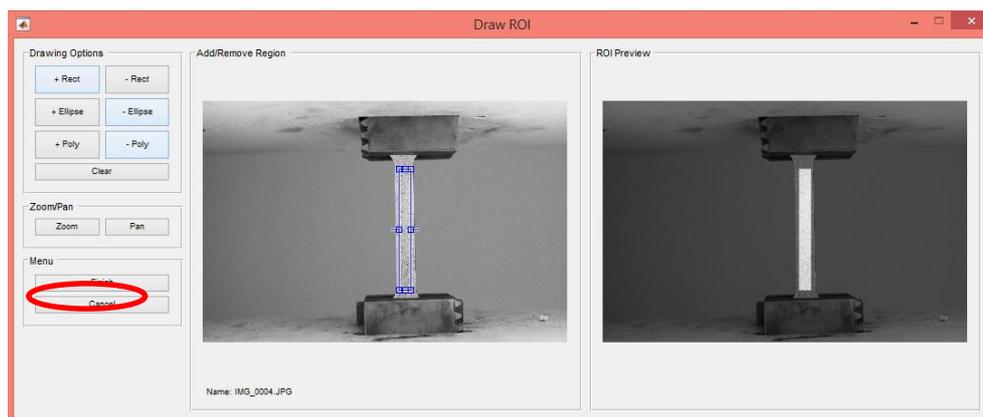
8. Ir a: Region of Interest > Set Reference ROI.



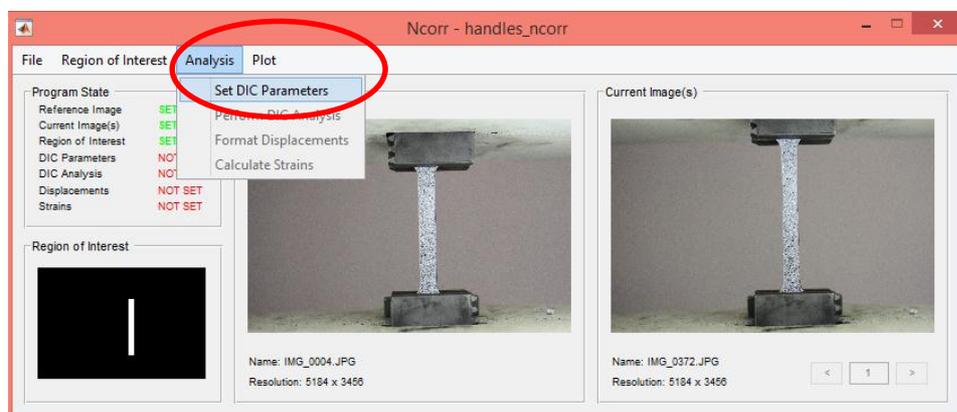
9. Aparecerá la ventana de "Draw ROI". Seleccionar la opción: "Draw ROI button".



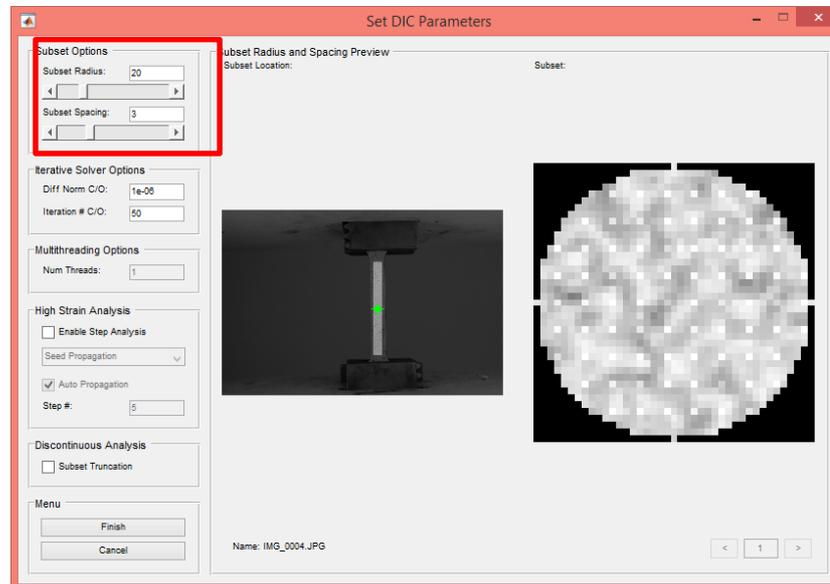
10. Trazar la región de interés en la imagen. Luego, seleccionar la opción “Finish” en la ventana de DRAW ROI.



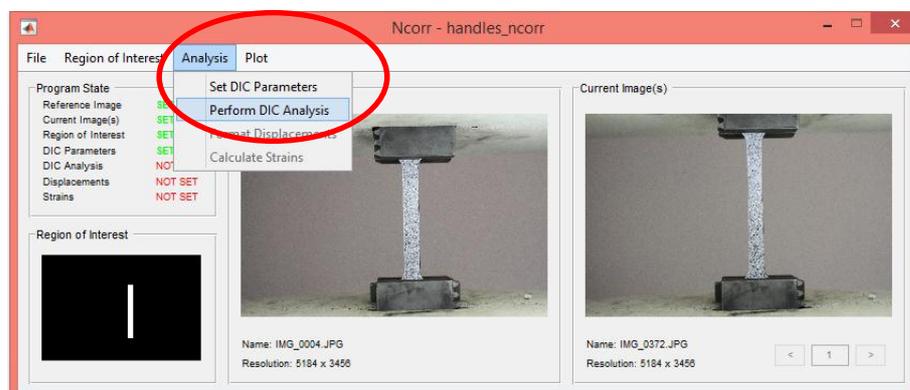
11. Ir a: Analysis > Set DIC Parameters.



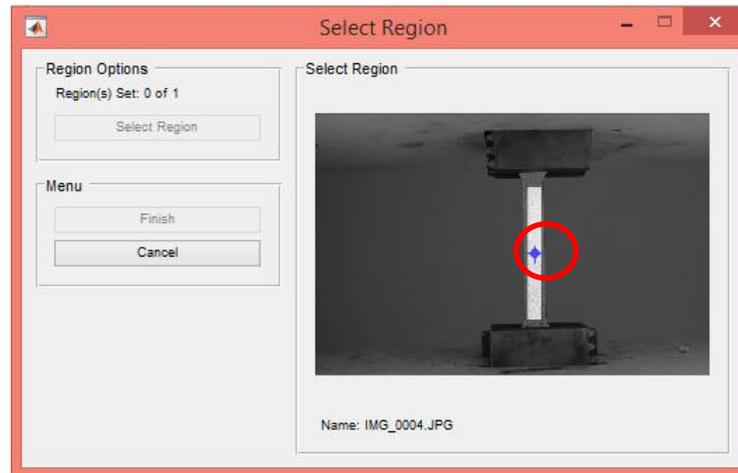
12. La ventana de “Set DIC Parameters” aparecerá. Seleccionar un radio de “subset” de 20 y un “subset” de espaciado de 3. Presionar la opción “finish”.



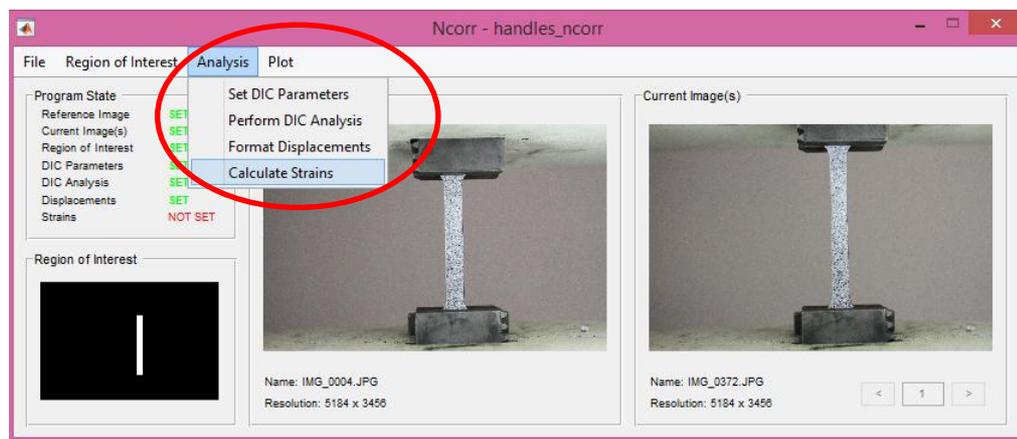
13. Ir a: Analysis > Perform DIC Analysis.



14. La ventana “Select Region” aparecerá. Seleccionar una región continua a procesar.

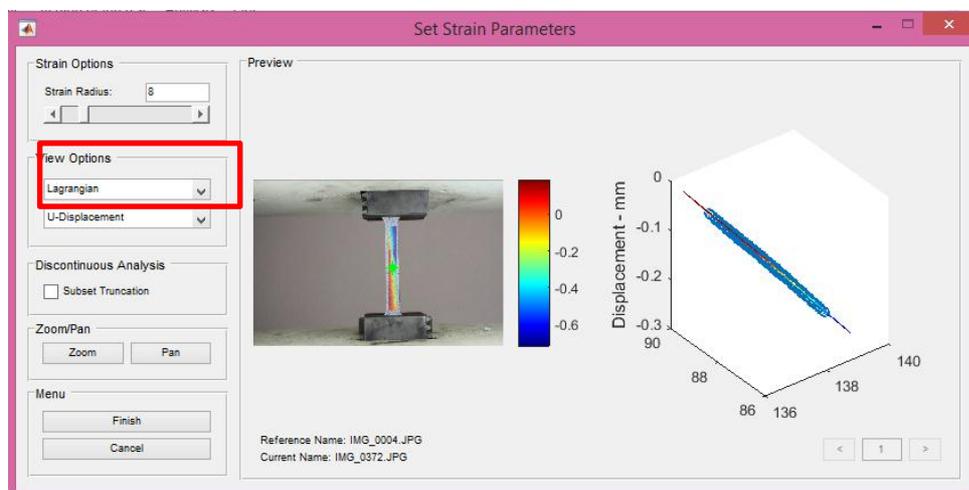


15. Ir a: Analysis > Calculate Strain.

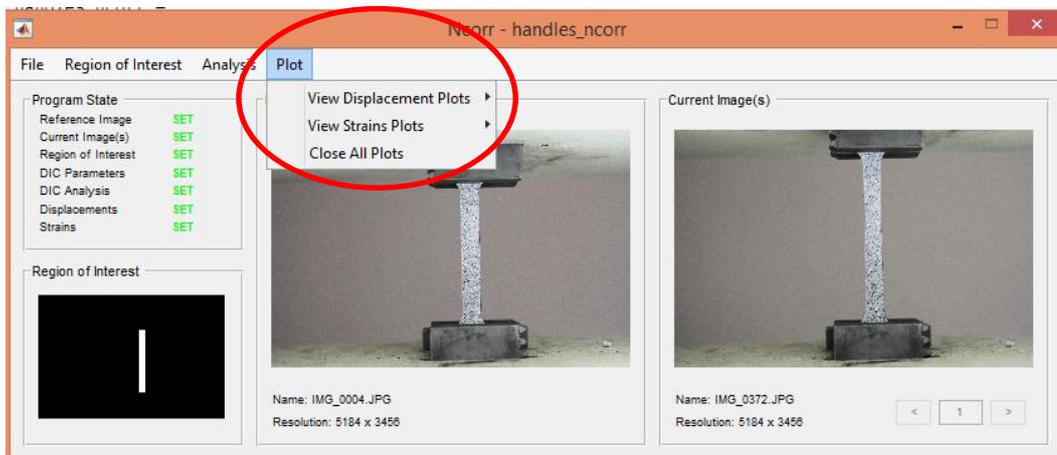


16. La ventana "Set Parameters" aparecerá. Seleccionar la opción "Lagrangian".

Presionar "finish".



17. Ir a: “Plot > View Displacement Plots or Plot > View Strain Plots”.



18. Para más detalles del uso del programa, revisar el manual del programa en el

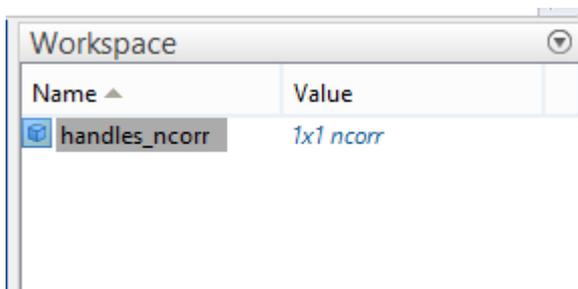
siguiente link: <http://www.ncorr.com/index.php/downloads>

ANEXO D

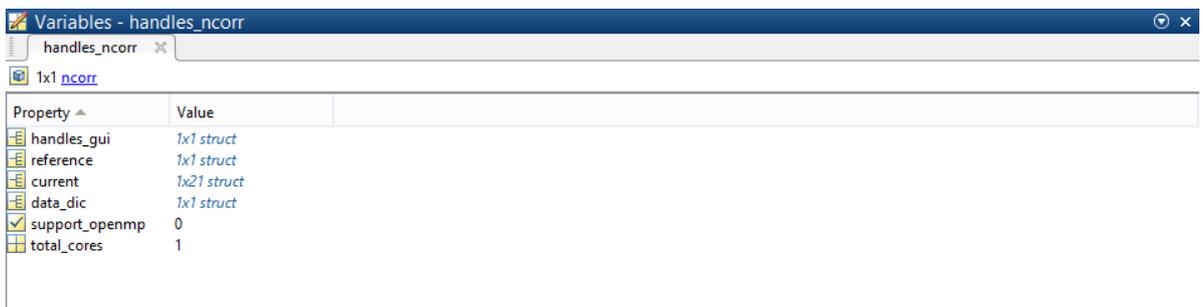
OBTENCIÓN DE LOS DATOS DE DESPLAZAMIENTO DEL PROGRAMA NCORR

Cuando los pasos del anexo C estén completados, se procede a obtener los datos de deformación de la probeta.

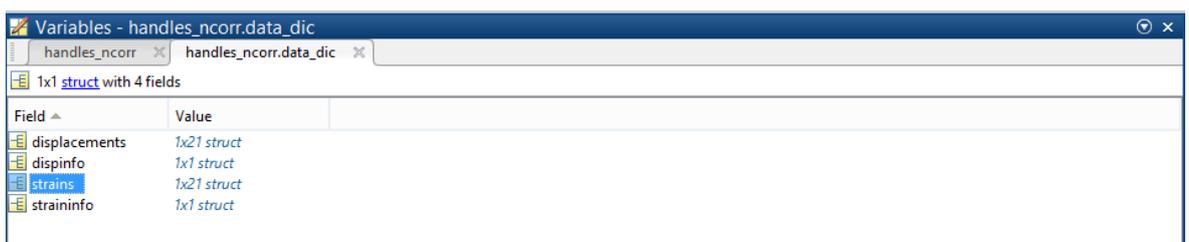
1. Dar doble click en la opción “handles_ncorr” ubicado en la ventana “workspace”



2. En la ventana que aparecerá, dar click en “data_dic”



3. Dar click en “strains”



4. Dentro de “strain”, está registrado todos los valores de deformación de la probeta en una matriz de 800 x 800. (El tamaño de la matriz va a depender de la región de análisis dibujada en el programa)
5. Para obtener los valores de deformación de cada fotografía, se utiliza el siguiente programa realizado en Matlab.

```

%% * * * * * * * * * * Analisis DIC con NCORR y MATLAB * *
* * * * *
% Inicializacion de matrices de deformacion de
referencia...
% Se guardan todas las matrices de referencia de la
deformacion de la probeta(sin deformar)
% en las variables r1,r2,r3.... etc..
tic, clc
r1=handles_ncorr.strains(1).plot_eyy_ref_formatted;
r2=handles_ncorr.strains(2).plot_eyy_ref_formatted;
r3=handles_ncorr.strains(3).plot_eyy_ref_formatted;
r4=handles_ncorr.strains(4).plot_eyy_ref_formatted;
r5=handles_ncorr.strains(5).plot_eyy_ref_formatted;
r6=handles_ncorr.strains(6).plot_eyy_ref_formatted;
r7=handles_ncorr.strains(7).plot_eyy_ref_formatted;
r8=handles_ncorr.strains(8).plot_eyy_ref_formatted;
r9=handles_ncorr.strains(9).plot_eyy_ref_formatted;
r10=handles_ncorr.strains(10).plot_eyy_ref_formatted;
r11=handles_ncorr.strains(11).plot_eyy_ref_formatted;
r12=handles_ncorr.strains(12).plot_eyy_ref_formatted;
r13=handles_ncorr.strains(13).plot_eyy_ref_formatted;
r14=handles_ncorr.strains(14).plot_eyy_ref_formatted;
r15=handles_ncorr.strains(15).plot_eyy_ref_formatted;
r16=handles_ncorr.strains(16).plot_eyy_ref_formatted;
r17=handles_ncorr.strains(17).plot_eyy_ref_formatted;
r18=handles_ncorr.strains(18).plot_eyy_ref_formatted;
r19=handles_ncorr.strains(19).plot_eyy_ref_formatted;
r20=handles_ncorr.strains(20).plot_eyy_ref_formatted;
r21=handles_ncorr.strains(21).plot_eyy_ref_formatted;
sum_ref=(r1+r2+r3+r4+r5+r6+r7+r8+r9+r10+r11+r12+r13+r14+r1
5+r16+r17+r18+r19+r20+r21);
prom_ref=sum_ref./21 ;
PROM_REF=prom_ref(255:726,599:620); %%Este es la
matriz de referencia reducida a 539x116 elementos
%Realizamos la figura de la probeta sin deformar de
referencia

```

```

% Empieza el analisis multigrafico

subplot(2,11,1)
spy(PROM_REF)
title('Probeta Sin Strain'), xlabel('REFERENCIA'), hold on

%%      Matrices de Deformacion

def1=handles_ncorr.strains(1).plot_eyy_cur_formatted;
def2=handles_ncorr.strains(2).plot_eyy_cur_formatted;
def3=handles_ncorr.strains(3).plot_eyy_cur_formatted;
def4=handles_ncorr.strains(4).plot_eyy_cur_formatted;
def5=handles_ncorr.strains(5).plot_eyy_cur_formatted;
def6=handles_ncorr.strains(6).plot_eyy_cur_formatted;
def7=handles_ncorr.strains(7).plot_eyy_cur_formatted;
def8=handles_ncorr.strains(8).plot_eyy_cur_formatted;
def9=handles_ncorr.strains(9).plot_eyy_cur_formatted;
def10=handles_ncorr.strains(10).plot_eyy_cur_formatted;
def11=handles_ncorr.strains(11).plot_eyy_cur_formatted;
def12=handles_ncorr.strains(12).plot_eyy_cur_formatted;
def13=handles_ncorr.strains(13).plot_eyy_cur_formatted;
def14=handles_ncorr.strains(14).plot_eyy_cur_formatted;
def15=handles_ncorr.strains(15).plot_eyy_cur_formatted;
def16=handles_ncorr.strains(16).plot_eyy_cur_formatted;
def17=handles_ncorr.strains(17).plot_eyy_cur_formatted;
def18=handles_ncorr.strains(18).plot_eyy_cur_formatted;
def19=handles_ncorr.strains(19).plot_eyy_cur_formatted;
def20=handles_ncorr.strains(20).plot_eyy_cur_formatted;
def21=handles_ncorr.strains(21).plot_eyy_cur_formatted;
%Matrices reducidas
%syms I      %definimos como simbolica la I para la
iteracion del for loop siguiente
%global i
    %for i=1:21
        %defi=defi(255:726,599:620)
    %end

%En versiones antiguas, se debe hacer la reduccion de las
matrices de
%la forma larga, como sigue:
def1= def1(255:726,599:620);
def2= def2(255:726,599:620);
def3= def3(255:726,599:620);
def4= def4(255:726,599:620);
def5= def5(255:726,599:620);

```

```
def6= def6(255:726,599:620);
def7= def7(255:726,599:620);
def8= def8(255:726,599:620);
def9= def9(255:726,599:620);
def10= def10(255:726,599:620);
def11= def11(255:726,599:620);
def12= def12(255:726,599:620);
def13= def13(255:726,599:620);
def14= def14(255:726,599:620);
def15= def15(255:726,599:620);
def16= def16(255:726,599:620);
def17= def17(255:726,599:620);
def18= def18(255:726,599:620);
def19= def19(255:726,599:620);
def20= def20(255:726,599:620);
def21= def21(255:726,599:620);
%Imagen 1 Probeta deformada
subplot(2,11,2)
spy(def1,'r')
title('t=0 seg')
    %Imagen 2 Probeta deformada
    subplot(2,11,3)
    spy(def2,'r')
    title('t=10 seg')
%Imagen 3 Probeta deformada
subplot(2,11,4)
spy(def3,'r')
title('t=20 seg')
    %Imagen 4 Probeta deformada
    subplot(2,11,5)
    spy(def4,'r')
    title('t=30 seg')
%Imagen 5 Probeta deformada
subplot(2,11,6)
spy(def5,'r')
title('t=40 seg')
    %Imagen 6 Probeta deformada
    subplot(2,11,7)
    spy(def6,'r')
    title('t=50 seg')
%Imagen 7 Probeta deformada
subplot(2,11,8)
spy(def7,'r')
title('t=60 seg')
    %Imagen 8 Probeta deformada
    subplot(2,11,9)
```

```
    spy(def8, 'r')
    title('t=70 seg')
%Imagen 9 Probeta deformada
subplot(2,11,10)
spy(def9, 'r')
title('t=80 seg')
    %Imagen 10 Probeta deformada
    subplot(2,11,11)
    spy(def10, 'r')
    title('t=90 seg')
%Imagen 11 Probeta deformada
subplot(2,11,12)
spy(def11, 'r')
title('t=100 seg')
    %Imagen 12 Probeta deformada
    subplot(2,11,13)
    spy(def12, 'r')
    title('t=110 seg')
%Imagen 13 Probeta deformada
subplot(2,11,14)
spy(def13, 'r')
title('t=120 seg')
    %Imagen 14 Probeta deformada
    subplot(2,11,15)
    spy(def14, 'r')
    title('t=130 seg')
%Imagen 15 Probeta deformada
subplot(2,11,16)
spy(def15, 'r')
title('t=140 seg')
    %Imagen 16 Probeta deformada
    subplot(2,11,17)
    spy(def16, 'r')
    title('t=150 seg')
%Imagen 17 Probeta deformada
subplot(2,11,18)
spy(def17, 'r')
title('t=160 seg')
    %Imagen 18 Probeta deformada
    subplot(2,11,19)
    spy(def18, 'r')
    title('t=170 seg')
%Imagen 19 Probeta deformada
subplot(2,11,20)
spy(def19, 'r')
title('t=180 seg')
```

```

    %Imagen 20 Probeta deformada
    subplot(2,11,21)
    spy(def20,'r')
    title('t=190 seg')
%Imagen 21 Probeta deformada
subplot(2,11,22)
spy(def21,'r')
title('t=200 seg')
%% Comparacion probeta inicial y probeta final
figure
subplot(1,2,1)
spy(PROM_REF) , title('Probeta sin Deformacion')
subplot(1,2,2)
spy(def21,'r'), title('Probeta Deformada en 200seg')
%% Comparacion por medio de superposicion de imagenes
figure , spy(PROM_REF), hold on
spy(def21,'r')

%% probeta sin deformar inicial
figure
spy(PROM_REF) ,title('Sin Deformacion'), xlabel('azul=no
strees'),
ylabel('direccion eyy')

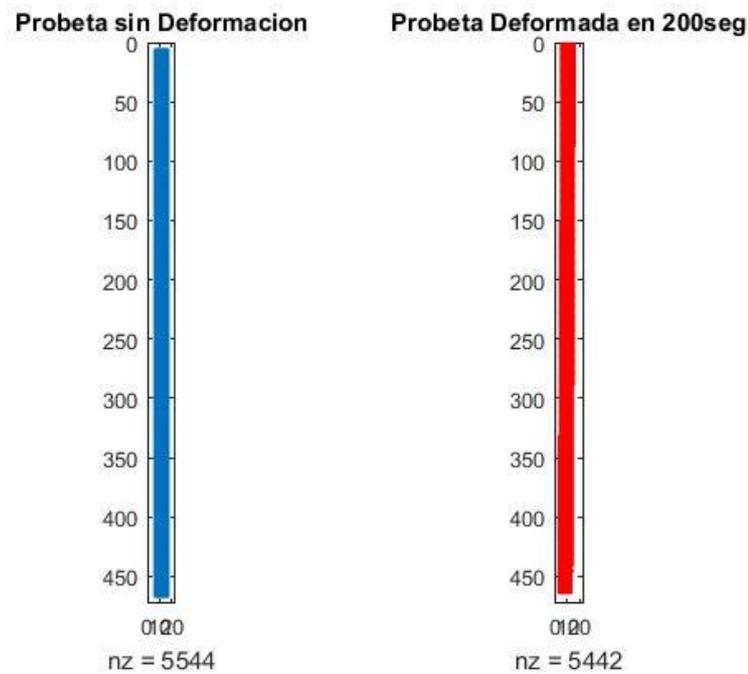
%% VALORES NUMERICOS DE DEFORMACION eyy
fprintf('Deformaciones de los pixeles en funcion del
tiempo\n');
d1=sum(def1(:,12))/464
d2=sum(def2(:,12))/464
d3=sum(def3(:,6))/464
d4=sum(def4(:,6))/464
d5=sum(def5(:,6))/464
d6=sum(def6(:,6))/464
d7=sum(def7(:,6))/464
d8=sum(def8(:,6))/464
d9=sum(def9(:,6))/464
d10=sum(def10(:,6))/464
d11=sum(def11(:,6))/464
d12=sum(def12(:,6))/464
d13=sum(def13(:,6))/464
d14=sum(def14(:,6))/464
d15=sum(def15(:,6))/464
d16=sum(def16(:,6))/464
d17=sum(def17(:,6))/464
d18=sum(def18(:,6))/464
d19=sum(def19(:,6))/464

```

```
d20=sum(def20(:,6))/464
d21=sum(def21(:,6))/464
```

```
toc
```

6. Los datos de esfuerzo, al igual que en el programa VIC-2D, se obtienen de la máquina de tracción.
7. Los resultados que se obtiene con este programa son las deformaciones de la probeta y las siguientes imágenes.



Secuencia de deformación

