

PONTIFICIA UNIVERSIDAD CATÓLICA DEL PERÚ

FACULTAD DE CIENCIAS E INGENIERÍA



**PONTIFICIA
UNIVERSIDAD
CATÓLICA
DEL PERÚ**

**PROPUESTA DE UNA METODOLOGÍA PARA EL USO DE
CORRELACIÓN DE IMÁGENES DIGITALES (DIC) EN ENSAYOS DE
TRACCIÓN EN ACERO, ABS Y RESINA EPÓXICA CON FIBRA DE
VIDRIO**

Tesis para optar al título de Ingeniero Mecánico

AUTOR:

DIEGO ALEJANDRO VERA CIEZA

ASESOR:

Dr. FRANCISCO AURELIO RUMICHE ZAPATA

Lima, julio del 2021

RESUMEN

En las últimas décadas se han desarrollado diversos tipos de nuevas tecnologías en diversas áreas de la ciencia e ingeniería, como por ejemplo en la ingeniería de materiales. Las técnicas que se emplean actualmente requieren una mayor obtención de información, facilidad de uso y un menor margen de error, una de las mejores técnicas que ha ganado popularidad en los últimos años es la técnica de correlación de imágenes digitales (DIC). La DIC es una técnica óptica que permite tomar información de toda la superficie de una probeta sin estar en contacto con esta. Entre los beneficios más resaltantes de la técnica DIC está la capacidad de realizar casi cualquier tipo de ensayo en cualquier tipo de material, sin importar su forma o composición, además debido a que en esta técnica no existe un contacto directo con la probeta se reduce considerablemente el margen de error.

En la industria de pruebas de materiales existen determinados ensayos que son utilizados en mayor frecuencia, como es el caso del ensayo de tracción, el cual se emplea para hallar propiedades importantes como el esfuerzo último y el esfuerzo de fluencia. De la misma manera, existen materiales que son empleados con mayor frecuencia para la realización de ensayos, como es el caso de el acero, el ABS y las resinas epóxicas con fibra de vidrio. Debido a la relevancia del ensayo de tracción en la industria y teniendo en cuenta el avance tecnológico para realizar pruebas en materiales, el presente trabajo tiene como objetivo desarrollar una metodología para aplicar la moderna técnica DIC a ensayos de tracción en los tres materiales mencionados. Para efectuar los ensayos a tracción, se emplearán los requerimientos de estos ensayos según las normas ASTM correspondientes a cada material. Esta metodología propuesta estudia los efectos del comportamiento de cada material sobre los parámetros de ensayo más adecuados al ejecutar la técnica DIC, presenta parámetros recomendados de acuerdo a experiencias pasadas y discute sobre cómo adaptar dichas recomendaciones a cada caso específico. Posteriormente, presenta la implementación de la técnica DIC basándose en un equipo GOM ARAMIS y el cálculo e interpretación de deformaciones de la probeta siguiendo las normas ASTM. La importancia de este trabajo radica en que sirve de referencia para la implementación de un ensayo de tracción utilizando la técnica DIC en algún material de naturaleza cercana a los evaluados en este trabajo.

Tabla de contenidos

Introducción.....	1
Capítulo 1: Generalidades.....	4
1.1. ¿Qué es correlación de imágenes digitales y para qué sirve?	5
1.2. Procedimientos generales	5
1.2.1. Preparación de la muestra	5
1.2.2. Preparación (set-up) del ensayo	5
1.2.3. Establecimiento de parámetros intrínsecos de la técnica DIC	5
1.2.4. Cálculo de los resultados	6
1.3. Descripción de componentes de un equipo DIC	7
1.3.1. Lentes y cámara:	7
1.3.2. Apertura de los lentes:	7
1.3.3. Exposición de la imagen captada por las cámaras:	7
1.3.4. Sistema de montaje de cámaras y lentes:	8
1.3.5. Fuentes de iluminación del equipo:	9
Capítulo 2: Parámetros de la técnica DIC	11
2.1. Variable de interés (Quantity of interest - QOI)	11
2.2. Región de interés (Region of interest - ROI)	11
2.3. Campo de visión (<i>Field of view</i> - FOV)	11
2.4. Necesidad de DIC 2D o 3D (estereoscópico)	12
2.5. Ángulo estéreo	13
2.6. Profundidad de campo	14
2.7. Gradientes espaciales	14
2.8. Piso de ruido	15
2.9. Tasa de fotogramas	15
2.10. Tiempo de exposición	15
2.11. Sincronización y desencadenación	15
Capítulo 3: Factores influyentes en la técnica DIC	16
3.1. Determinación del recubrimiento superficial de la probeta	16
3.2. Elección el tamaño de probeta	21
3.3. Sujeción de la probeta	22
Capítulo 4: Requerimientos por material y norma de ensayo	23

4.1. Requerimientos para acero estructural	23
4.1.1. Requerimientos del comportamiento del acero estructural	23
4.1.2. Requerimientos de norma ASTM E8: Ensayos de tracción en metales	24
4.2. Requerimientos para ABS	28
4.2.1. Requerimientos del comportamiento del ABS	28
4.2.2. Requerimientos de la norma ASTM D638:	
Ensayos de tracción en polímeros	29
4.3. Requerimientos para resina epóxica con fibra de vidrio	33
4.3.1. Requerimientos del comportamiento de la fibra de vidrio en resina	33
4.3.2. Requerimientos de la norma ASTM D3039:	
Propiedades de tracción en materiales de matriz polimérica	34
Capítulo 5: Implementación de la técnica DIC	42
5.1. Procedimiento de ensayo usando el equipo GOM ARAMIS 5M:	42
5.1.1. Montaje del equipo y selección de la probeta.	42
5.1.2. Calibración del equipo	47
5.1.3. Preparación de la probeta	50
5.1.4. Establecimiento de parámetros de ensayo	52
5.1.5. Procesamiento de imágenes	55
5.1.6. Cálculo de deformaciones	58
Capítulo 6: Conclusiones	61
Bibliografía	62

INTRODUCCIÓN

Con el avance de la tecnología, la realización de ensayos en la ingeniería de materiales se ha beneficiado de nuevas técnicas, las cuales ofrecen un progreso en términos de precisión, fidelidad, adaptabilidad, entre otras cualidades. Sin embargo, no todas se han podido implementar ni formalizar fácilmente para su empleo según estándares, normas, tecnologías y procedimientos ya establecidos. Una de estas técnicas se conoce como correlación de imágenes digitales (*digital image correlation* o DIC por sus siglas en inglés), que surgió de la necesidad de obtener resultados de deformación más precisos. Lo cual se logra debido a que se toman numerosos puntos de medición sobre una probeta, y no solamente uno o dos como suelen realizar otras técnicas tradicionalmente usadas.

Entre todos los ensayos de materiales utilizados actualmente, uno de los más resaltantes es el ensayo de tracción, cuya rapidez y simplicidad de uso facilitan la obtención de propiedades mecánicas de importancia en aplicaciones de ingeniería. Para la ejecución correcta de este ensayo existen dos variables que deben medirse correctamente: La fuerza aplicada a la probeta y la deformación de la misma. Esta fuerza se suele medir usando una celda de carga; por otro lado, las deformaciones requieren de más opciones de medición debido a que se deben evaluar diversos factores que pueden ocasionar errores en el cálculo de propiedades mecánicas si no son seleccionados adecuadamente. Uno de estos factores es la heterogeneidad del material; por ejemplo, esta se puede observar en las variaciones de la estructura de grano de un acero en diferentes regiones de la probeta (ocasionadas por distintos métodos de fabricación), lo que genera una gradiente de deformación entre estas distintas zonas. Las distintas deformaciones en cada pequeña región de la probeta dan lugar a sendas propiedades mecánicas; sin embargo, estas son difíciles de medir con métodos tradicionales pues estos miden la deformación usando solamente unos pocos puntos de referencia, lo que deja de lado efectos locales que no se encuentren cerca de los puntos de referencia empleados y, por ende, las particularidades de cada zona del material ensayado [1]. Es diferente el resultado si se emplea una técnica como la correlación de imágenes digitales (DIC), que posibilita el uso de diversos puntos de medición, que se pueden ajustar de acuerdo a cada circunstancia.

Otro de los factores influyentes en la medición de deformaciones en materiales es la geometría de la probeta, pues esta influye en la manera que se deforma la misma. En algunas geometrías complejas, los campos de deformación suelen volverse no uniformes y, por ende, se complica la medición de deformaciones. En el caso del ensayo de tracción, esto se manifiesta mediante la aparición de un cuello en el lugar previo a donde la probeta comenzará a romperse. Esto implica que al medir la deformación, esta propiedad esté influenciada por la ubicación del cuello en la probeta (u otro factor geométrico) y no solamente por factores intrínsecos del material, como sería ideal al medir deformaciones [2]. La técnica de correlación de imágenes digitales (DIC), minimiza el efecto que estos factores geométricos tienen sobre las mediciones de deformación ya que es capaz de captar y considerar diversas inconsistencias geométricas.

Por otro lado, se debe tener en cuenta la manera en la que se miden las deformaciones, los métodos convencionales en los que se realiza esta medición involucran contacto con la probeta, lo que influye en la deformación de la misma dependiendo del lugar donde hace contacto, la presión que ejercen sobre la superficie, etc. Según Goldberg et al., uno de estos métodos, que involucra el uso de galgas extensiométricas, crea concentradores de esfuerzo en los puntos de contacto con la probeta, lo que influye en la medición de deformaciones de la misma [3]. Es por ello que la técnica DIC resulta práctica para evitar este tipo de errores de medición, pues no requiere de contacto con la probeta por lo que permite medir deformaciones en una región de interés local sin influenciar la deformación de la misma [2].

La razón por la que la técnica DIC es capaz de emplearse sin que los resultados se vean afectados por los problemas antes mencionados radica en la manera en se realizan las mediciones. Esta consiste en el empleo de cámaras que captan imágenes sucesivas de la probeta a lo largo de su deformación durante el ensayo; estas imágenes luego se procesan para obtener la deformación a lo largo del tiempo de ensayo. Es un requisito para que la técnica funcione que en dos imágenes sucesivas cualesquiera registradas por las cámaras se puedan identificar y dar seguimiento a grupos de píxeles (llamados facetas) que componen estas imágenes obtenidas y, por ende, el desplazamiento de cada una de estas facetas entre imágenes consecutivas (**Figura 1**). Se debe tener en cuenta que estas facetas se identifican debido a un algoritmo utilizado por el software DIC que les da seguimiento aun cuando estas se hayan desplazado. Por ejemplo, en la **Figura 1** se puede apreciar una ligera diferencia entre las imágenes de ambas facetas; asimismo, se observa que, al superponer estas dos facetas en imágenes consecutivas, se genera un vector de desplazamiento para dicho par de imágenes. Para que el software pueda identificar estas facetas en el material es necesario que existan un patrón aleatorio impregnado a la superficie (también llamado patrón estocástico), para lo cual es común emplear un patrón de puntos aleatorios como se ve en la **Figura 1**. Al extrapolar esto a todas las facetas de la imagen se puede obtener un campo de deformaciones [1].

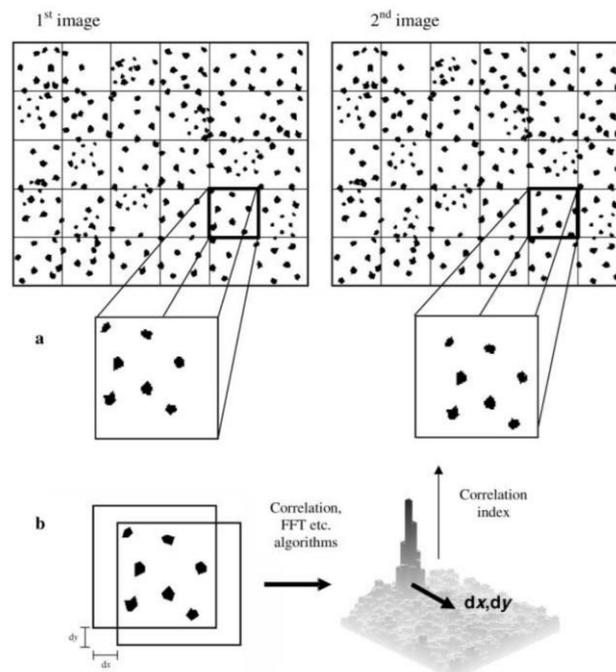


Figura 1. Representación de imágenes consecutivas en la técnica DIC. a) Imágenes consecutivas en la técnica DIC. b) Imágenes superpuestas. [1]

Conforme ha evolucionado la técnica de correlación de imágenes digitales, esta ha ganado popularidad debido a su simplicidad, a la caída del costo de instalación de los equipos y al incremento de la capacidad de cómputo de las computadoras. Además, diversos avances han facilitado la preparación del experimento y posibilitado su implementación a más tipos de probetas y materiales. Por ejemplo, dependiendo del software utilizado y el algoritmo empleado por el mismo, es posible que marcas superficiales inherentes al material sean suficientes para distinguir entre las facetas a crear sin ser necesaria la aplicación de un patrón estocástico superficial artificial, lo que posibilita su aplicación en materiales en los que no sea posible aplicar algún recubrimiento superficial. Sin embargo, sí es recomendable la aplicación de un patrón artificial en los casos en los que sea posible debido a que posibilita un mejor control del experimento, como se detallará luego [1].

Por otro lado, cuando se evalúan ensayos normados, en los cuales las probetas tienen una forma geométrica definida y sencilla, tanto con el uso de extensómetros físicos o extensómetros virtuales (usados en la técnica DIC) se obtienen resultados análogos. Esto se demostró al comparar los resultados de graficar curvas esfuerzo-elongación usando la técnica DIC (con extensómetros virtuales) y compararlas con las curvas generadas al emplear extensómetros físicos usuales en ensayos de tracción ya que se observó un error de sólo $\pm 1.5\%$ [4]. También se notó que los errores que ocurren por causas aleatorias sobrepasan por un orden de magnitud a los errores ocasionados por cambiar de técnica entre el uso de extensómetros físicos o extensómetros virtuales, por lo que el empleo de una técnica u otra no influye en la confiabilidad del experimento al realizar ensayos normados [5].

Otras de las ventajas prácticas de la técnica DIC es que se pueden instalar extensómetros o galgas extensiométricas en la superficie de la probeta. De acuerdo a esto, realizando una retroalimentación del experimento al observar en qué lugar de las imágenes capturadas por las cámaras aparecen las primeras fisuras, se pueden colocar dichas galgas en un futuro ensayo cerca a estas donde aparecen estas fisuras para medir deformaciones en las zonas más críticas de la probeta o pieza a ensayar [6]. Asimismo, la técnica DIC no se ve afectada por la temperatura del ensayo, la cual sí limita otras técnicas, por ejemplo, el uso de extensómetros de contacto no es apropiado cuando el ensayo demanda condiciones de temperaturas elevadas, por esta razón, es recomendable utilizar la técnica DIC en ensayos que se realicen en dichas circunstancias [5].

Más aún, la técnica DIC permite reconocer los campos de deformación en los ensayos de tracción y, debido a ello, facilita el reconocimiento de cambios microestructurales que ocurren en el material. Por ejemplo, esto permite identificar zonas de endurecimiento por deformación o zonas afectadas por calor (ZAC) en probetas por soldadura, como muestra Switzner et al. [7].

Por último, Quanjin et al. realizaron un estudio en el cual se midieron propiedades mecánicas de probetas de aluminio, fibra de vidrio con resina y resinas epóxicas utilizando tres distintas técnicas: galgas extensiométricas, un método experimental propuesto por el autor y la técnica DIC. El objetivo fue comparar dichas técnicas y evaluar si existía alguna diferencia significativa entre los resultados. En la **Figura 2** se observan las curvas de esfuerzo versus elongación de los tres materiales evaluados, se deduce que para cada material, las curvas de las distintas técnicas son similares, esto quiere decir que los resultados son similares. Finalmente la investigación concluyó que

la técnica DIC genera resultados aceptables al realizar mediciones de propiedades mecánicas en ensayos de tracción [8].

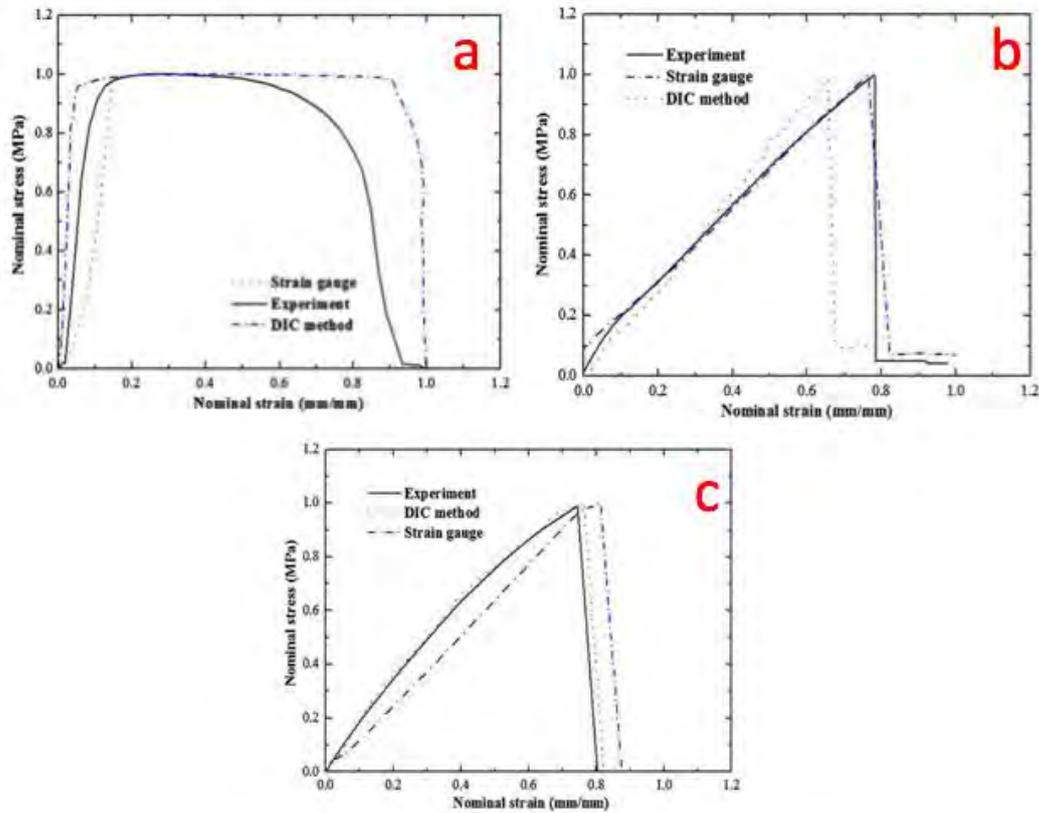


Figura 2. Curva esfuerzo-elongación en aluminio (a), fibra de vidrio con resina (b) y resina epóxica (c), al emplear diferentes métodos (experimental, galgas extensiométricas y DIC) [8].

El presente trabajo tiene por objetivo proponer una metodología para la aplicación de DIC a ensayos de tracción de acero, ABS y resina epóxica con fibra de vidrio, utilizando como guía las normativas ASTM, se han seleccionado dichos materiales debido a su alta rotación en instancias industriales y académicas.

La justificación de esta metodología radica en que, a pesar de que actualmente existen diversas técnicas para llevar a cabo distintos tipos de ensayos en diferentes materiales, es importante disponer de la mayor cantidad de opciones, en especial si el ensayo a realizar presenta algunas de las limitaciones en los métodos tradicionales mencionados en los párrafos anteriores, ya que en estas situaciones la técnica DIC sostiene una ventaja considerable. Por esta razón, es fundamental poseer el conocimiento necesario para realizar ensayos implementando DIC.

CAPÍTULO 1: GENERALIDADES

En el presente capítulo se presentará la información necesaria para describir la técnica de correlación de imágenes digitales, sus usos, ventajas, procedimiento y componentes.

1.1. ¿Qué es correlación de imágenes digitales y para qué sirve?

La correlación de imágenes digitales (DIC) es una herramienta efectiva y práctica para la medición de deformaciones de campo completo (*full field measurement*) y es ampliamente utilizada en el campo de la mecánica experimental. En otras palabras, es una técnica utilizada para la medición de deformaciones que se basa en el procesamiento de imágenes digitales y de computación numérica. El término en inglés *full field measurement* se refiere a que esta medición se realiza sin contacto físico, este es el caso de las técnicas ópticas tales como DIC [9].

La técnica DIC emplea subconjuntos de forma cuadrada con suficientes variaciones de intensidad dentro de los mismos para que el software los pueda diferenciar. Estos subconjuntos son seleccionados de una imagen de referencia, la cual es capturada por las cámaras en el primer instante del experimento. Luego, al iniciar la deformación de la probeta se captura la segunda imagen, en la cual, mediante un algoritmo de optimización, se buscan subconjuntos (u objetivos) deformados cuyos patrones estocásticos sean los más parecidos a los patrones que presentan los subconjuntos de la imagen de referencia. Las diferencias entre el subconjunto de referencia y el subconjunto objetivo (o ya deformado) generan un vector de desplazamiento en el centro de los subconjuntos usados. Básicamente, la técnica DIC se basa en que el subconjunto escogido debe ser diferenciado de cualquier otro subconjunto en la imagen deformada. Por esta razón utiliza un patrón de puntos al azar de grises, también conocido como patrón estocástico, el cual se deforma junto a la superficie del objeto de estudio y se usa para conseguir información de la deformación de la superficie en la técnica DIC [10].

Una manera particular de mejorar la precisión de la técnica DIC es usar algoritmos de registro para el nivel de los subpíxeles. Con este fin se han desarrollado muchos algoritmos, entre los cuales está el método de Newton-Rhapson, el cual es el más lento de todos, pero también el que da mayor precisión [10]. El algoritmo empleado en un determinado equipo DIC generalmente lo elige el proveedor del equipo y software DIC.

Usualmente se pueden corroborar las mediciones de las propiedades cuando se usa una técnica DIC mediante el uso de galgas extensiométricas unidas a la superficie, extensómetros, y transductores diferenciales de respuesta lineal. Sin embargo, existen algunos problemas con cada uno de estos métodos de apoyo, los cuales se listan a continuación: Para las galgas se suelen tener problemas de desalineamientos y dificultades de adhesión a la superficie; para los extensómetros, se deben retirar los mismos antes de la falla para evitar que se dañen; requerimientos de contacto superficial en general; información en un solo punto (por limitaciones de la misma técnica) y la sensibilidad a la deformación transversal de las galgas en el caso que sean resistivas. Además, en el caso de los materiales compuestos se tiene usualmente una superficie irregular y un campo de deformación no homogéneo debido a las fibras empleadas en estos materiales, lo cual perjudica a la realización del ensayo en general [11].

1.2. Procedimientos generales

Para realizar un ensayo utilizando la técnica DIC existen ciertos procedimientos que deben ser tomados en cuenta. A continuación, se hará una breve descripción general de estos.

1.2.1. Preparación de la muestra:

Los materiales se suelen limpiar con un equipo de remoción de grasa para eliminar residuos de productos propios del proceso de fabricación. Se rocía pintura negra (o blanca) sobre la muestra para formar un fondo uniforme y posteriormente al secado de la primera pintura se rocía un patrón de puntos del color contrario de forma aleatoria. El tamaño de estos puntos debe ser del mismo tamaño que los usados en un patrón de calibración que se emplea para calibrar el sistema [11].

1.2.2. Preparación (set-up) del ensayo:

Se calibra el equipo con patrones de calibración del tamaño de la región de interés (ROI). Para esto se emplea un patrón de puntos, el cual, de acuerdo al tamaño de la probeta, debe coincidir en la separación y en el tamaño de los puntos al compararse con el patrón de la probeta. Este proceso de calibración le da al software la capacidad de identificar a la probeta dentro de una región cúbica con caras del tamaño del patrón físico usado para la calibración del ensayo, dentro del cual debe ubicarse la ROI. Luego de haber calibrado el sistema se empieza el ensayo mecánico para el cual deben fijarse la frecuencia de muestreo, así como otros parámetros [11].

1.2.3. Establecimiento de parámetros intrínsecos de la técnica DIC:

Se pueden variar los siguientes parámetros de entrada, para poder obtener resultados adecuados para cada experimento a realizar: Tamaño de la faceta (o tamaño de una vecindad de píxeles), paso de la faceta y base de cálculo o tamaño de la matriz computacional de desplazamiento. Por ejemplo, aumentar el tamaño de la faceta mejora la precisión del reconocimiento de los puntos, pero aumenta el tiempo de cómputo. Asimismo, al aumentar el paso de la faceta se mejora la precisión y exactitud local de las deformaciones calculadas, pero se pierde en sensibilidad a las variaciones locales de deformación. Por otro lado, la precisión y exactitud local se pueden mejorar incrementando la base del cálculo. Según esto, una base usual a usar es de 3 pero puede incrementarse por requerimiento de mayor exactitud a 5 o 7 [11]. Las **figuras 3, 4 y 5** hacen referencia a estos parámetros y a una representación gráfica de lo que significa aumentar estos. Se profundizará más sobre los parámetros antes mencionados en capítulos posteriores.

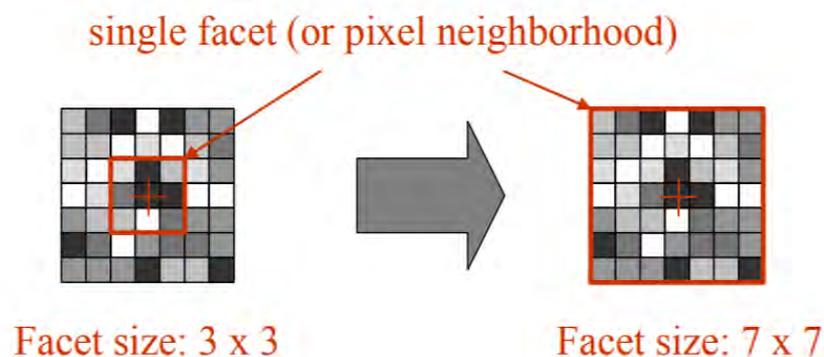


Figura 3. Incremento del tamaño de la faceta ^[11].

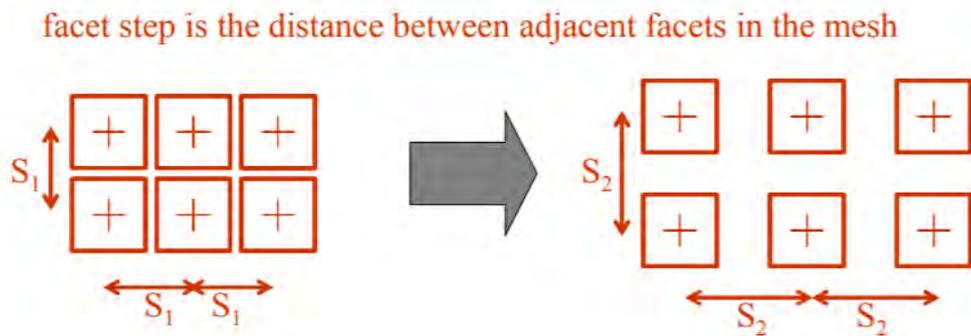


Figura 4. Incremento del paso de la faceta ^[11].

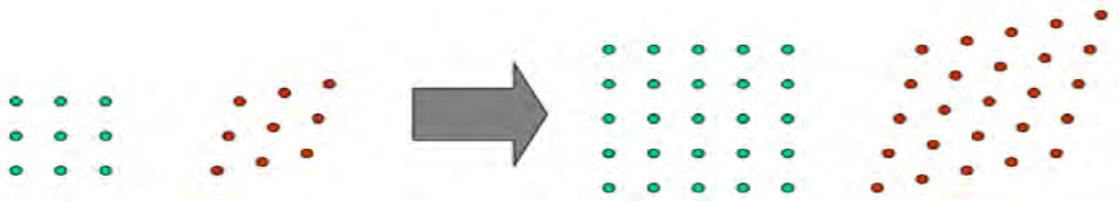


Figura 5. Incremento de la base de cálculo ^[11].

1.2.4. Cálculo de los resultados:

Para calcular la deformación de la muestra se toma el promedio del campo de deformaciones. Para ello se considera que, si se elige un área en el centro de la región de interés (ROI) del espécimen, sin que contenga esquinas o bordes de la probeta, se pueden conseguir deformaciones promedio independientes de los parámetros mencionados anteriormente: tamaño de la faceta, paso de la faceta y base de cálculo. Por otro lado, si se selecciona un área que incluya algún borde o esquina, el cálculo de la deformación se vuelve algo sensible a la base de cálculo y muy sensible a los otros dos parámetros [11].

1.3. Descripción de componentes de un equipo DIC

Conocer las características de cada componente es útil al momento de seleccionar un equipo para un determinado ensayo; asimismo, permite conocer los límites del experimento en caso de querer implementar la técnica DIC a un ensayo con un equipo que ya se tenga. A continuación, se describirán los componentes de un equipo DIC usual y cómo seleccionarlos correctamente.

1.3.1. Lentes y cámara:

La selección de los lentes y cámara tiene por objetivo obtener la profundidad de campo, el campo de visión, la distancia de medición, la resolución espacial, la resolución temporal y el piso de ruido deseados. Estos dos equipos se deben elegir en conjunto debido a que sus efectos en los parámetros deseados no son independientes. Típicamente un equipo DIC comercial incluye las cámaras necesarias para poder realizar experimentos sin problemas. Sin embargo, en caso de que se desee adaptar

una cámara externa a un equipo DIC es importante tener en cuenta que algunos sistemas encontrados en las cámaras como el enfoque automático de los lentes, el cambio automático de la apertura de las cámaras durante la toma de fotos o el entrelazado de filas de las imágenes de cuadros consecutivos no son adecuados para utilizarse en cámaras de la técnica DIC. Adicionalmente, es útil conocer si las cámaras que se planean usar cuentan con algún sistema de filtrado de imágenes de tipo *anti-aliasing* pues esto implica que la posibilidad de usar o no algún otro tipo de filtro quede limitada; se recomiendan usar cámaras de tipo *machine-vision*, los cuales son el estándar de cámaras usadas en equipos DIC. Por último, existen dos tipos de lentes, los de distancia focal fija y los lentes con capacidades de zoom (distancia focal variable). Para variar el campo de visión de la cámara en el primer tipo se debe variar la distancia de medición, sin embargo, en el segundo se puede realizar variando la distancia de medición o la distancia focal. Esto último vuelve a los lentes de distancia focal variable más aptos para diversos tipos de situaciones, pero también aumenta el riesgo de distorsiones ópticas no deseadas debido a la mayor complejidad de la configuración de parte óptica del ensayo. En el caso de los lentes de distancia focal variable, es importante la existencia de anillos de distanciamiento y anillos de bloqueo para evitar que los parámetros ópticos seleccionados puedan alterarse accidentalmente [12].

1.3.2. Apertura de los lentes:

Se relaciona con la profundidad de campo que se desea obtener; mayores aperturas tienen una mayor profundidad de campo que aperturas pequeñas. Además, tiene influencia en la cantidad de luz que entra a los lentes, por ello se debe regular para tener una exposición correcta de la probeta deseada; en consecuencia de lo antes mencionado, la apertura debe ser la misma o muy similar en ambas cámaras [12].

1.3.3. Exposición de la imagen captada por las cámaras:

La exposición se refiere al proceso mediante el cual el sensor de la cámara capta la luz y se mide para comprobar que sea la adecuada en cada caso. Una imagen está correctamente expuesta si es que no se pierden detalles de la imagen porque esté demasiado clara o demasiado oscura, es decir, es un balance de tener un contraste adecuado. Para ello se deben balancear tres parámetros importantes en la cámara: el ISO (parámetro que regula la cantidad de luz que recibe la cámara), la apertura y la velocidad de obturación. Como se observa en la **Figura 6**, al variar uno de estos parámetros, se afectan también otras variables como el ruido en el caso del ISO, la profundidad de campo en el caso de la apertura, y la estabilidad de imagen (necesidad de un trípode estable) en el caso de la velocidad de obturación [12].



Figura 6. Parámetros que afectan la exposición correcta de la imagen.

1.3.4. Sistema de montaje de cámaras y lentes:

El sistema de montaje debe contar con articulaciones con suficiente libertad de movimiento para variar la posición y orientación de las cámaras y lentes, sobre todo para cuando se requiera calibrar el equipo. Debe contar con mecanismos de bloqueo para evitar el movimiento de las piezas durante el ensayo. Además, debe cuidarse que las imágenes observadas por ambas cámaras sean lo más parecidas posibles. Por otro lado, si la región de interés fuese una imagen corta pero ancha se debe montar la cámara horizontalmente; en caso la región de interés fuera larga pero delgada (como en el caso de probetas a tracción), se deberá montar la cámara girada 90° de su posición usual (de manera que el campo de visión de la cámara sea más largo y delgado, alineándose más a la región de interés). Asimismo, para prevenir las distorsiones de imágenes es recomendable que el plano estéreo (es el plano formado al unir los centros de los lentes de ambas cámaras y el centro la región de interés) sea perpendicular a la superficie de la probeta a ensayar (**Figura 7**) [12].

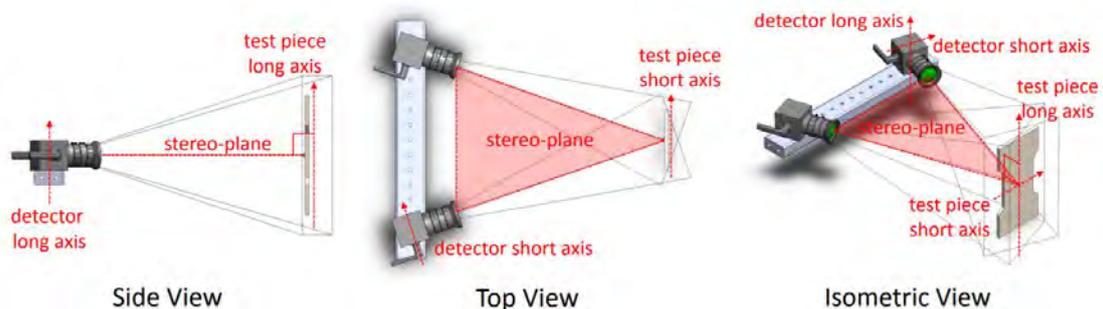


Figura 7. Imagen que describe la orientación ideal de las cámaras respecto a la región de interés. Se observa que es deseable un ángulo de 90° entre el plano estéreo formado y la superficie de la probeta [12].

Se prefiere el empleo de configuraciones físicamente estables; el peso de las cámaras no debe crear el suficiente torque como para que el volcamiento del equipo sea un riesgo. Tampoco debe permitirse la transmisión de vibraciones cercanas al equipo, que

puedan llegar de otros ensayos realizados cercanos a las cámaras. Esto puede hacerse alejándose de la fuente de vibraciones, programando horarios dónde ensayos que causen vibraciones no se realicen al mismo tiempo que un ensayo DIC o, en caso que sea necesario, usando amortiguadores en el trípode o soporte de la cámara [12].

Algunos tipos de sistemas de montaje son los siguientes:

- Sistemas de montaje estándar de una sola barra empotrada. Sirve más en DIC de una sola cámara (DIC 2D).
- Sistemas de montaje con trípodes. Tienen una barra sobre el trípode la cual se conecta a este y garantiza que ambas cámaras (en el caso de DIC tridimensional o 3D) estén firmemente unidas al mismo apoyo.
- Sistemas con soportes de calidad de estudio en vez de trípodes. Similar al anterior, pero vienen con un contrapeso incluido y más grados de libertad de movimiento en las cámaras.
- Sistema de montaje *custom*. Se fabrica para una necesidad en particular y, por ende, es más costoso y no se incluye en algún equipo DIC comercial.

Por otro lado, debe verificarse que el sistema sea suficientemente rígido para no incurrir en variaciones de posición por efectos de calor proveniente de la cámara o de las luces utilizadas. Esto puede realizarse asegurándose de calibrar y asegurar las cámaras y luces una vez hayan llegado a la temperatura de trabajo adecuada. En caso que el calor emitido sea excesivo, puede montarse un ventilador aparte para enfriar las luces y cámaras, cuidando que la vibración no se transmita a las cámaras [12].

1.3.5. Fuentes de iluminación del equipo:

Se pueden usar luces adicionales a la iluminación ambiental si el ensayo lo requiere, por ejemplo, cuando los parámetros usados requieran mayor luminosidad para una exposición adecuada. Sin embargo, se debe tener cuidado de no usar luces que tengan componentes infrarrojos pues pueden afectar la temperatura de la probeta a medir. Se recomienda usar fuentes de luz de polarización cruzada para mejorar el contraste en las imágenes, o difusa para evitar reflejos innecesarios [13]. Adicionalmente, debe tomarse en cuenta la tasa de fotogramas pues, si fuera muy cercana a la frecuencia de corriente alterna de las luminarias, se tendrán imágenes de distinta luminosidad en cada etapa distinta. Finalmente, debido a que la técnica DIC se beneficia de mayor contraste, una manera de mejorar la precisión sería incrementando este; para ello, un buen indicador de un nivel de contraste adecuado en el patrón estocástico es que se posean 50 o más niveles en escala de grises de contraste en el patrón [14]. La razón se observa en la **Figura 8**, se observa que el error decrece significativamente para dicha diferencia en niveles de escala de grises. Se debe recordar que la técnica DIC usa imágenes monocromáticas (en blanco y negro) por lo que, si se considera el empleo de una cámara de 8 bits, se tendrán 256 niveles de escala de grises; se menciona esto para tener una referencia del nivel de contraste requerido usando luces y pintura adecuadas [15].

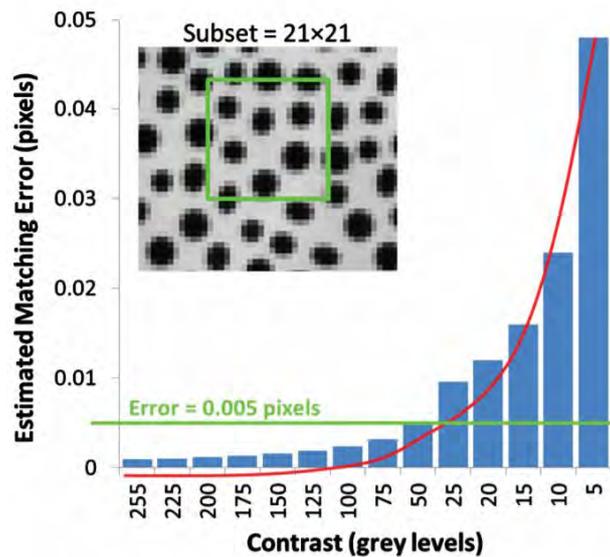


Figura 8. Error en la técnica DIC y su comportamiento exponencial vs. el nivel de contraste entre los colores blanco y negro de la imagen del patrón estocástico que observa la cámara.^[14]

Asimismo, el tamaño de la faceta es de suma importancia para garantizar que las imágenes se observen adecuadamente, pues cada faceta se procesa de manera independiente en la técnica DIC. La iluminación que recibe la probeta afecta el nivel de contraste que tienen los puntos de pintura de la matriz del patrón estocástico y esto es influenciado por el tamaño de faceta seleccionado; es por ello que este tamaño debe seleccionarse considerando la iluminación del equipo (**Figura 9**).

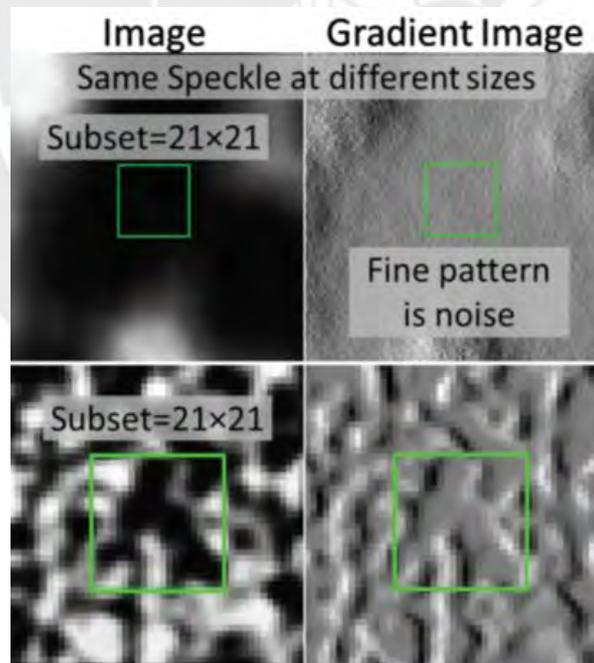


Figura 9. Muestra de facetas. Se observa que el tamaño de la faceta en las imágenes superiores es muy pequeño para el tamaño de las manchas del patrón estocástico, lo que genera un muy bajo contraste y un ruido e imprecisión elevados. En la figura inferior se observa un nivel de contraste adecuado ^[14].

CAPÍTULO 2: PARÁMETROS DE LA TÉCNICA DIC

Para poder diseñar un procedimiento DIC cuya finalidad de uso sean los ensayos de materiales es necesario que se conozcan los requerimientos de dicho ensayo, pues esto determina la factibilidad del uso de DIC para dicho ensayo. En caso de no poderse realizar la técnica DIC con dichos requerimientos, se deberían revisar y ajustar los mismos para que su uso sea factible. Muchos de estos datos o parámetros pueden ser específicos de un equipo DIC mas no de otro, por lo que conocer exactamente qué se requiere del ensayo brinda la información necesaria para saber si el equipo DIC con el que se cuenta es capaz de cubrir los requerimientos o si se debe buscar otro [12].

A continuación, se detallarán algunos parámetros a considerar cuando se ejecuta un ensayo DIC. No se incluyen, sin embargo, a parámetros propios de las cámaras, sino solamente a los intrínsecos a un ensayo DIC.

2.1. Variable de interés (Quantity of interest - QOI):

La variable de interés se refiere a la variable que es necesaria medir y controlar para conseguir resultados de ensayo satisfactorios y normalmente se menciona en las normas de ensayos de materiales. En el caso de un ensayo de tracción la variable de interés generalmente es la tasa de deformación o elongación [12].

2.2. Región de interés (Region of interest - ROI):

Es la región física de una probeta a ensayar en la cual se realizarán mediciones de las variables del ensayo. Las partes de la probeta que queden fuera de la región de interés no se tomarán en cuenta para el ensayo. Normalmente la región de interés la define una norma; en el caso de las normas de ensayos a tracción ASTM, esta región suele ser la parte de la probeta que se encuentra en la longitud calibrada [12].

2.3. Campo de visión (Field of view - FOV):

Es el ángulo abarcado por la cámara a través del cual esta puede captar el mundo real (**Figura 10**). Cualquier objeto que quede fuera del campo de visión de la cámara no se podrá visualizar. El campo de visión de la cámara usada puede variar de acuerdo al lente y tamaño del sensor interno que se utilice [16]. Para optimizar la resolución espacial se recomienda que la región de interés sea del tamaño más grande posible sin pasarse de los límites definidos por el campo de visión de la cámara [17].

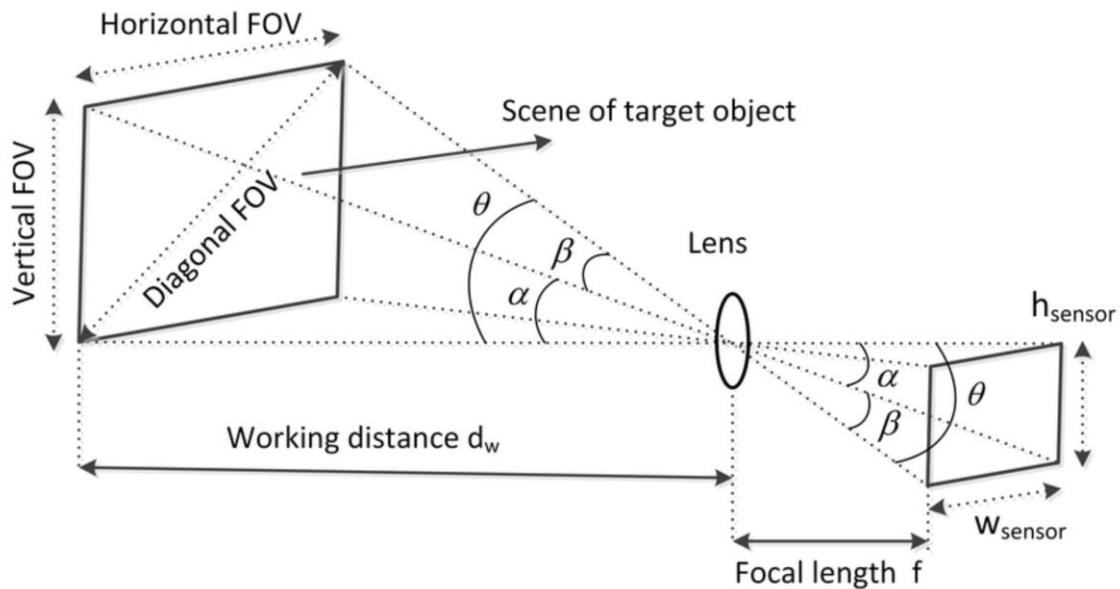


Figura 10. Representación del campo de visión de una cámara. Se presentan los ángulos que definen el espacio de visión de la cámara de manera representativa [17].

Por otro lado, también debe tenerse en cuenta al espaciamento requerido para el ensayo, lo cual se refiere a las condiciones espaciales del lugar de realización del ensayo. Las dimensiones del espacio habilitado para la realización del ensayo pueden afectar la capacidad de utilizar distancias de medición distintas en la técnica DIC, por ejemplo. También podría dificultar la calibración del equipo DIC, debido a la falta de espacio para ubicar un objeto de calibración [12].

2.4. Necesidad de DIC 2D o 3D (estereoscópico):

Esencialmente la variedad bidimensional de la técnica DIC emplea una sola cámara y la tridimensional, dos, como se observa en la **Figura 11**. La técnica 2D solo se puede usar en deformaciones uniaxiales o biaxiales, donde todas las deformaciones ocurran en un mismo plano. Sin embargo, esta posee una posible fuente de error pues no es posible captar deformaciones fuera de un plano de deformación, lo que puede tergiversar las mediciones de deformación dentro del plano. Por ejemplo, si al comprimir una probeta rectangular esta se flexiona hacia el opuesto de la cámara, el sistema 2D interpreta esta deformación en el plano de deformación como una contracción y no como una flexión, debido a que es lo que observa la cámara. Por ello se recomienda usar DIC 3D cuando se pueda, siempre que el espacio posibilite el acople de dos cámaras y no solo una [18].

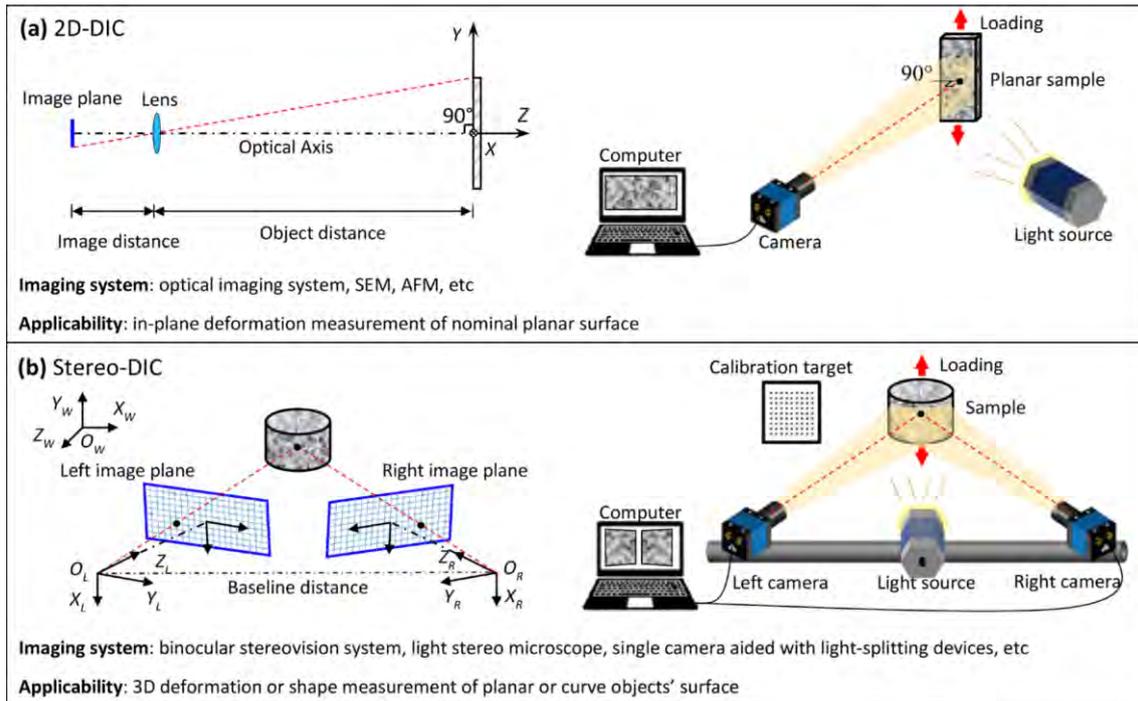


Figura 11. Comparación de técnicas DIC a) 2D, b) 3D [18].

La **Tabla 1** resume el proceso de toma de decisiones para seleccionar el uso de la técnica DIC de una o dos cámaras.

	2D	3D
Number of cameras	1	2
Calibration requirement	No, however needed and possible to gain information on displacement	Yes
Influence of out-of-plane movements of the specimen	Significant influence on strain measurement	No influence on the strain measurement
Out-of-plane measurement	Not possible	Yes; measurement of the out-of-plane movement
Minimal measurement area	Down to 1 mm ²	Limited by the size and position of the cameras to each other

Tabla 1. Comparación entre arreglo bidimensional y tridimensional [19].

2.5. Ángulo estéreo:

Este ángulo viene dado por la geometría descrita en el arreglo DIC 3D, como se observa en la **Figura 12**. Mientras más grande sea este ángulo se mejora la precisión de los desplazamientos fuera del plano de deformación, sin embargo, se obtienen mayores incertidumbres en desplazamientos en el plano de deformación. Asimismo, mientras más pequeño sea dicho ángulo ocurre lo inverso. Este ángulo también afecta la profundidad de campo: mientras más grande sea el ángulo estéreo, más difícil será que la probeta se mantenga en foco ante cualquier movimiento fuera del plano y viceversa. La relación entre la precisión y el ángulo estéreo también se ve afectada por la distancia focal del lente que usan las cámaras, por ende, para mantener una determinada precisión con una distancia focal corta se requiere un ángulo estéreo mayor. Normalmente, para mediciones en objetos planos, se prefiere optar por minimizar el error de mediciones en el plano de deformación, en consecuencia, es recomendable usar distancias focales grandes y ubicar la imagen en el centro del campo de visión de las cámaras (**Figura 13**). Además, se observa que tanto para ángulos estéreo pequeños o grandes, un lente de mayor distancia focal minimiza el error de exactitud en el plano de deformación [20] (**Figura 13**).

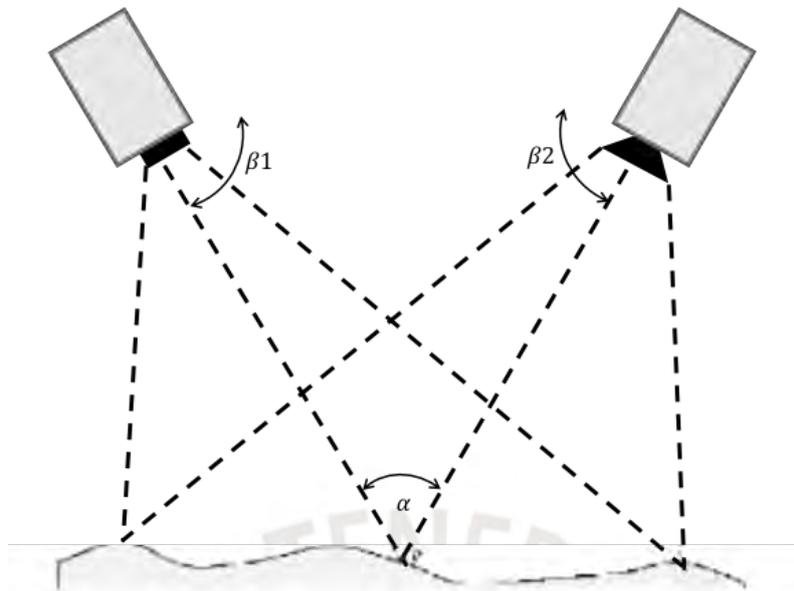


Figura 12. Ejemplo de ángulo estéreo. α Representa el ángulo estéreo.

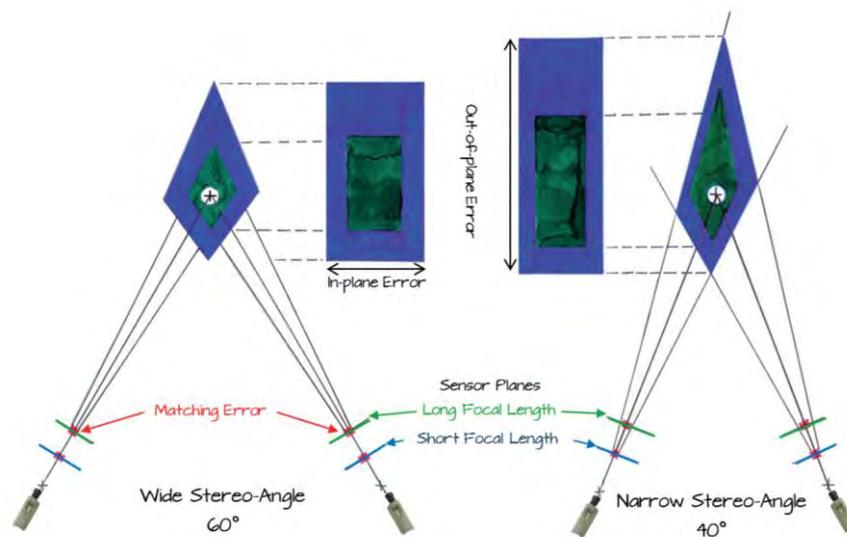


Figura 13. Comparación de incertidumbre entre un arreglo con ángulo estéreo de 60° y 40°. Los rectángulos verdes representan la incertidumbre de exactitud de mediciones en el plano de deformación obtenida con un lente de 75 mm y los azules, para uno de 8 mm [20].

Finalmente, para tener buenos resultados en situaciones generales se presentan recomendaciones de ángulos en función a la distancia focal utilizada [21]:

- Para distancias focales de 8 a 12 mm se debe usar un ángulo estéreo mayores a 35°.
- Para distancias alrededor de 17 mm se debe usar un ángulo superior a 25°.
- Para distancias mayores a 35 mm se pueden usar ángulos de 15° o 10°.

2.6. Profundidad de campo:

La profundidad de campo es la distancia entre lo más lejano y cercano que pueden encontrarse las imágenes para encontrarse enfocadas con claridad. La superficie (más específicamente la región de interés) que deben enfocar las cámaras debe estar siempre enfocada con claridad, por lo que, en caso de que se tenga poca profundidad de campo y la probeta ensayada se deforme fuera del plano de deformación, podría no aparecer toda la superficie correctamente enfocada. De esta manera, cuando se esperen deformaciones fuera del plano o se tengan superficies no planas (i.e. esferas o cilindros), se debe optar por una mayor profundidad de campo. También se debe tomar en cuenta la relación entre el ángulo estéreo y la profundidad de campo presentada en el inciso anterior [12].

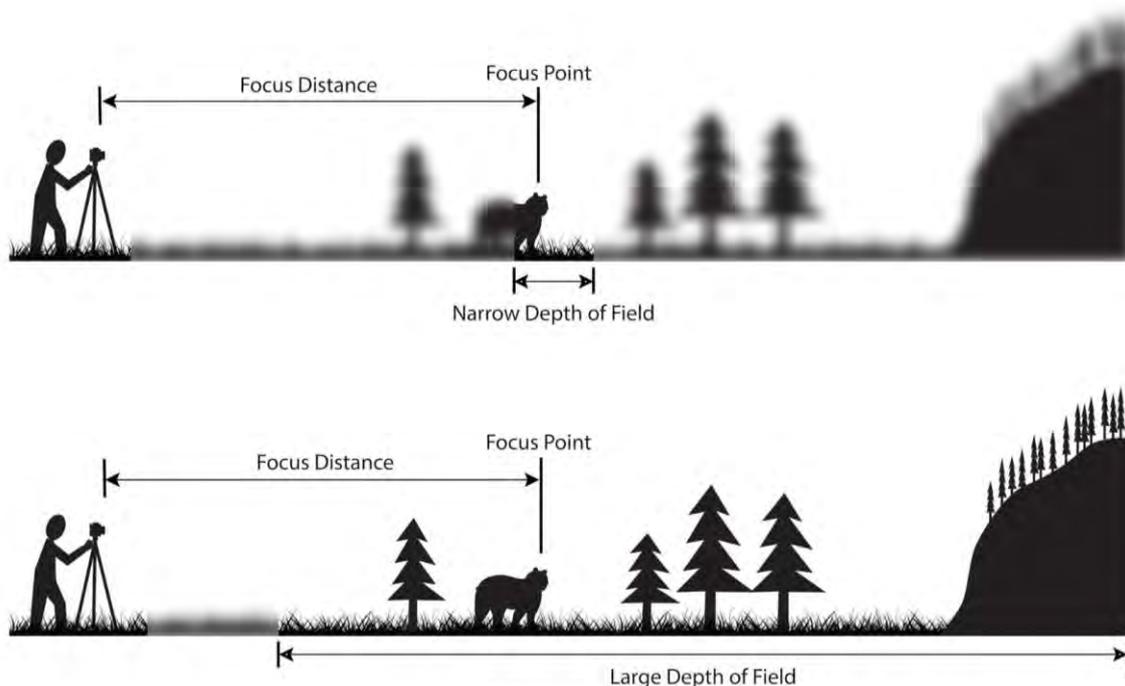


Figura 14. Imagen superior: Poca profundidad de campo. Imagen inferior: Gran profundidad de campo.
Fuente: Photography life

2.7. Gradientes espaciales:

Es necesario conocer las gradientes espaciales de la variable de interés. Esto se refiere a cómo varía dicha variable a lo largo de la región de interés durante la prueba. Conocer esta gradiente permite definir parámetros para el uso de DIC como la resolución de la cámara, la profundidad de campo, tamaño de la faceta y paso de faceta [12].

2.8. Piso de ruido:

El piso de ruido es el límite de medición de una señal debajo de la cual no se considera en la medición. Actúa como un filtro con las interferencias que pueden ocurrir en mediciones de valores muy pequeños y es importante para medir correctamente la variable de interés. Este piso de ruido para ciertos tipos de ensayo es una recomendación de alguna norma, algún estudio realizado por expertos o a la experiencia de los ensayistas; por ejemplo, en el caso de ensayos DIC, la tasa de deformación local se regula de tal manera que tasas muy pequeñas no se midan pues pueden deberse a factores externos como vibraciones o errores de precisión del equipo DIC [12].

2.9. Tasa de fotogramas:

Se refiere a la cantidad de fotogramas por unidad de tiempo que captura la cámara, usualmente se mide en fotogramas por segundo (fps). La tasa de fotogramas a usar depende de la aplicación; sí es necesaria una alta tasa de fotogramas en caso los efectos que se desean capturar en el ensayo ocurren a gran velocidad, mas, si los efectos que se desean capturar ocurren lentamente, no será necesaria una tasa tan elevada. Por ejemplo, si se desea capturar el momento de estrechamiento de sección en un ensayo a tracción en acero no es necesaria una tasa alta, pero si se requiere captar deformaciones de un ensayo dinámico la tasa debe aumentarse (caso de *high speed DIC*). Asimismo, para que el software DIC pueda rastrear las facetas sin inconvenientes, es necesario que entre fotograma y fotograma no exista un gran desplazamiento. Esta consideración depende del software a usar, pero una recomendación general es que el desplazamiento máximo de las facetas entre fotograma y fotograma sea una faceta de distancia. Por último, no olvidar considerar que el tamaño de datos aumenta considerablemente al aumentar la tasa de fotogramas, por lo que el almacenamiento puede ser un problema en aquel caso [12].

2.10. Tiempo de exposición:

Es el tiempo en el que el obturador de las cámaras estará abierto recibiendo luz hasta que complete la foto. No obstante puede considerarse como un parámetros propio de las cámaras, se incluye como parámetro de un ensayo DIC debido a su relación con el desplazamiento máximo permitido de la probeta. Es importante porque, si esta deformación es muy rápida y el tiempo de exposición no es lo suficientemente pequeño, habrá poca claridad en las imágenes generadas [22]. Usualmente el desplazamiento máximo permitido durante el tiempo de exposición toma el valor del piso de ruido de la variable de interés. Es decir, durante el tiempo en que la cámara toma la foto no pueden ocurrir desplazamientos en las facetas mayores a los que son considerados como el software como interferencias que no se miden [22].

El desplazamiento durante el tiempo de exposición se puede medir de la siguiente manera:

$$\begin{aligned} \text{Desplazamiento por tiempo de exposición [px]} \\ = \text{Velocidad} \left[\frac{\text{mm}}{\text{s}} \right] \times \text{Escala de imagen} \left[\frac{\text{px}}{\text{mm}} \right] \times \text{tiempo de exposición [s]} \end{aligned}$$

Por otro lado, debe considerarse que el tiempo de exposición nunca puede ser mayor al inverso de la tasa de fotogramas.

2.11. Sincronización y desencadenación:

Ambos factores consideran cómo se sincronizan las imágenes captadas por las cámaras con mediciones como las de fuerza, deformación, etc. medidas por otros instrumentos. Además, considera como provocar el inicio de todas estas mediciones en simultáneo al empezar el ensayo [12].

CAPÍTULO 3: FACTORES INFLUYENTES EN LA TÉCNICA DIC

El ensayo de tracción usando DIC contiene una serie de procedimientos cuya correcta realización es fundamental para que el ensayo sea satisfactorio. Estos procedimientos son indispensables en que la técnica DIC pueda medir las deformaciones correctamente y que el ensayo tenga validez. Asimismo, al adaptarse esta técnica a un ensayo de tracción, existen otros aspectos propios de los materiales a ensayar que tienen una gran influencia en los resultados del ensayo y puede influir en la selección de parámetros del mismo.

3.1. Determinación del recubrimiento superficial de la probeta

La técnica DIC funciona al correlacionar movimientos de la superficie de la probeta en imágenes consecutivas. Esto permite conocer la deformación de la probeta. Para ello se debe asegurar que las deformaciones de la superficie correspondan a la deformación de la probeta. Esto quiere decir que, en el empleo de recubrimientos o acabados a la probeta, puede ocurrir que se deformen diferente a lo que se deforma el resto de la probeta (en términos coloquiales porque el recubrimiento no “está pegado” al resto del material). Por ello es preferible que se retiren recubrimientos que puedan causar problemas de este tipo. Además, es necesario que la superficie de la probeta contenga elementos aleatorios que permitan que las cámaras de la técnica DIC tengan un seguimiento adecuado, como puede ser una textura o un patrón aleatorio. En caso el material no tenga estos elementos que permitan el trabajo adecuado de la técnica DIC, se debe implementar un recubrimiento a la probeta que suele ser en forma de un patrón estocástico hecho con pintura negra con manchas o puntos blancos o viceversa.

El contraste de los puntos del patrón estocástico debe ser similar a lo largo de la probeta y esto se consigue fácilmente a través de una distribución aleatoria, como usando pintura en spray de una manera adecuada. Debido a que en la técnica DIC importan elongaciones locales de hasta 0.1% (pues muchos metales se deforman plásticamente a ese orden de magnitud), se debe procurar también la medición de deformaciones a un nivel de subpíxeles. Esto ocurre porque para elongaciones tan pequeñas solamente se desplazarán unos pocos píxeles en total en la imagen. Por ejemplo, para una imagen de resolución 1000 x 1000 píxeles de elongación vertical de 0.1% habrá solamente una fila de píxeles horizontales de deformación en toda la imagen. Entonces se requerirá usar interpolación para poder captar deformaciones a nivel de subpíxeles [1].

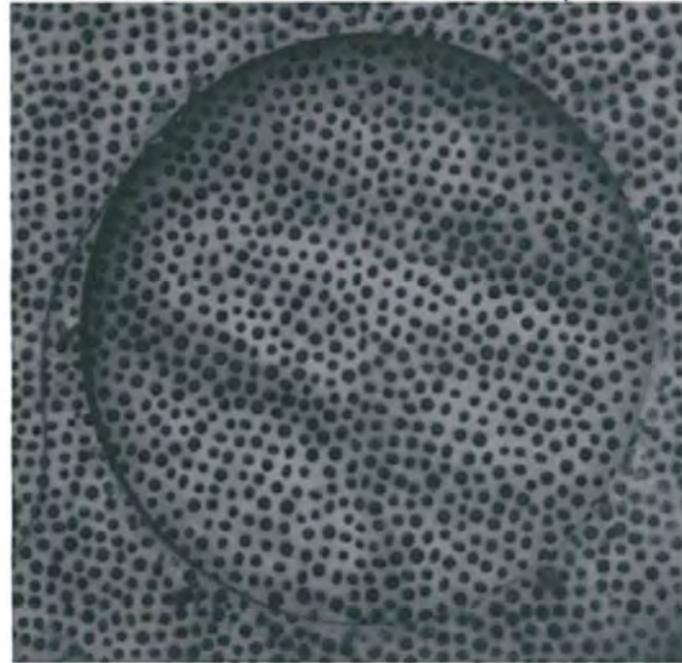
Un algoritmo adecuado en la técnica DIC será capaz de generar un adecuado campo de deformaciones (de alta resolución espacial) que se puede diferenciar respecto a la posición para generar un campo de elongaciones locales. Debido a que cada faceta tiene un solo valor de desplazamiento, es necesario que las facetas sean relativamente pequeñas para que, al diferenciarse la deformación para así conseguir un mapa de elongaciones locales, este último campo tenga sentido. Esto quiere decir que, si no se toman los parámetros de tamaño de faceta y paso de faceta correctamente, se pueden tener facetas contiguas con valores vectoriales opuestos de elongación, lo cual no es lo que ocurre realmente en la probeta. Esto se puede remediar elevando el número de píxeles o puntos del patrón estocástico en cada faceta, es decir agrandando su tamaño, sin embargo, existe un límite: si la faceta es demasiado grande, diferentes puntos dentro

de ella se comportarán de distinta manera lo que resultará en un desplazamiento promedio que no es lo que ocurre localmente a menor escala en la realidad [1].

Lo anterior se puede solucionar empleando la sobreposición, es decir que facetas compartan algunos píxeles, de tal manera que sean suficientemente grandes para tener una alta resolución espacial, mas sin perder efectos locales que afecten el valor promedio en la faceta. Sin embargo, una sobreposición excesiva tampoco es recomendable debido a que algunos puntos que pesen más para calcular la deformación de la faceta (debido a que pueden tener más píxeles de tamaño por la aleatoriedad del proceso de creación del patrón) pueden repetirse en múltiples facetas, y se podría normalizar este error aleatorio. Esto último no ocurre en caso que no haya sobreposición pues al no compartirse puntos entre facetas, este tipo de "errores" se distinguen claramente por el software y no afectan en gran medida al campo de deformaciones. Por ello, Quinta da Fonseca et al. (2005) recomienda alrededor de un 20% de sobreposición en las facetas, y esto genera aproximadamente un error del 0,5 % aproximadamente [1].

Para que el recubrimiento antes mencionado funcione adecuadamente se debe considerar que en la técnica DIC cada faceta se procesa independientemente, por lo que es imperativo que dentro de cada faceta existan elementos de distinción de la probeta suficientes para un procesamiento exitoso. Esto con el fin de que el tamaño de la faceta sea el menor posible y se puedan captar mayores gradientes de deformación locales. Para que este tamaño de faceta sea el menor posible, se debe considerar que en cada faceta deben existir dos o tres puntos (manchas) para que se pueda correlacionar entre etapas. De acuerdo a esto, para que el tamaño de la faceta sea pequeño, los puntos deberán ser pequeños. Esto quiere decir que la cantidad de píxeles necesarios para definir un punto debe ser la menor posible [14]. La cantidad anterior tiene un mínimo posible debido al efecto del *aliasing* (solapamiento en procesamiento de imágenes): Se deben usar al menos tres píxeles para que un punto se pueda definir correctamente al momento de procesar las imágenes. Aunque en muchos casos se sigue este mínimo número de puntos, al adaptar la técnica para regiones de interés más grandes se suelen usar cantidades de píxeles por punto mayores, debido a limitaciones en la resolución total de la cámara [14]. Por otro lado, se debe tomar en cuenta que en caso haya deformaciones de compresión, los puntos del patrón espectrométrico no se comprimen a tamaños menores a tres píxeles. Lo mismo ocurre en DIC 3D, pues no todas las zonas de la región de interés tienen la misma escala de imagen, por ende, debe cuidarse no usar un tamaño de puntos muy cercano al mínimo en el caso de 3D pues puede no cumplirse este requerimiento para todas estas regiones. Ahora, para conocer el tamaño físico que debe tener un punto se debe calcular usando de dato la escala de imagen con la que se trabaja en la cámara, que relaciona cuantos píxeles por milímetro hay (**Figura 15**). Conseguido el tamaño físico en milímetros que debe tener un punto del patrón espectrométrico, se debe practicar la realización del mismo antes de aplicarse en la probeta.

Camera Resolution = 384 x 376 pixels



FOV = 1200mm

Equations:

$$\left(\frac{\text{FOV}}{\#\text{-pixels}}\right) = \text{Pixel Size (mm/pixel)}$$

$$(\text{Pixel Size}) * (3 \text{ pixels}) = \text{Speckle size (mm)}$$

Figura 15. Cálculo del tamaño de puntos (speckle size) requerido usando la resolución de la cámara y el tamaño del campo de visión para una probeta ^[14].

Son requerimientos de la pintura usada el tener que adherirse completamente a la probeta y deformarse junto a ella. Para ello se sugiere realizar una limpieza adecuada a la probeta, evitando que grasas o elementos extraños se coloquen entre la capa de pintura y el material de la probeta; además, en caso de que la probeta se presuma a tener un comportamiento dúctil, se debería realizar el ensayo inmediatamente después que la pintura se coloque sobre la probeta, evitando así que esta se cure y fragiliza (en el caso de que la probeta se comporte frágilmente, se deberá esperar a que la pintura cure completamente). La pintura tampoco debe degradarse rápidamente o formar bultos o gotas. Finalmente, debe cuidarse que no produzca reflejos hacia las cámaras, aunque esto puede mitigarse usando filtros de polarizado, ya sea en las cámaras o en las luces. En el caso puntual de realizar un ensayo de tracción, no se debe rociar pintura sobre la superficie a ser sujeta por la mordaza, lo que evitará deslizamientos innecesarios.

A continuación la **Figura 16** ilustra la influencia de un patrón estocástico de puntos finos sobre la menor desviación estándar de un ensayo usando la técnica DIC.

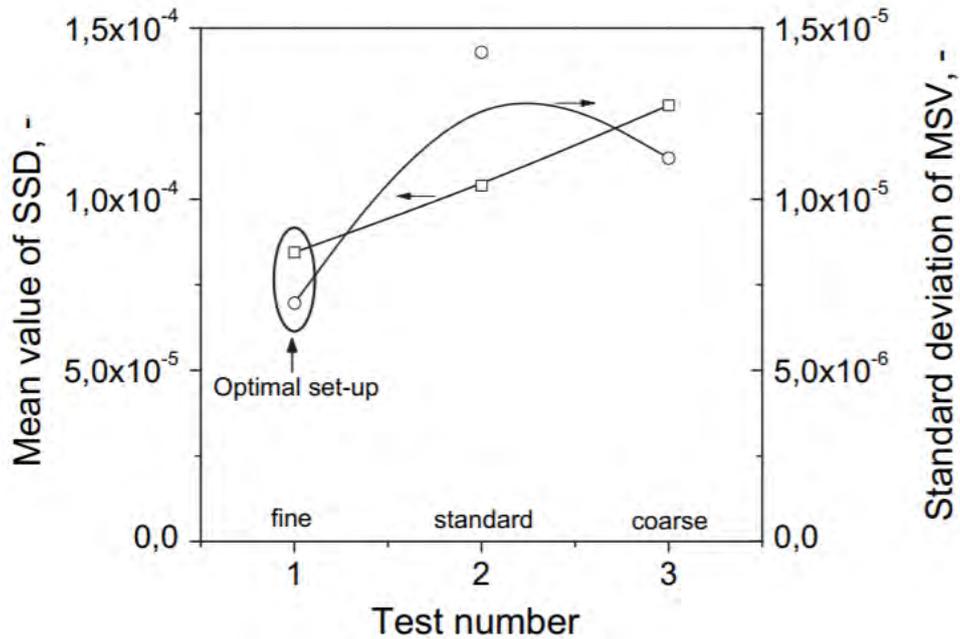


Figura 16. Efecto del tiempo del tamaño del patrón en SSD y MSV^[19].

3.2. Elección el tamaño de probeta

Para la aplicación del patrón espectrométrico antes mencionado se pueden seguir distintas técnicas. Para objetos de regular tamaño (por ejemplo, menores a 50 cm x 50 cm) se suele emplear una capa de pintura blanca y sobre esta se rocía con un atomizador pintura negra en un ángulo inclinado tal que se lleguen a formar puntos negros sobre la matriz blanca [23] (**Figura 17**).

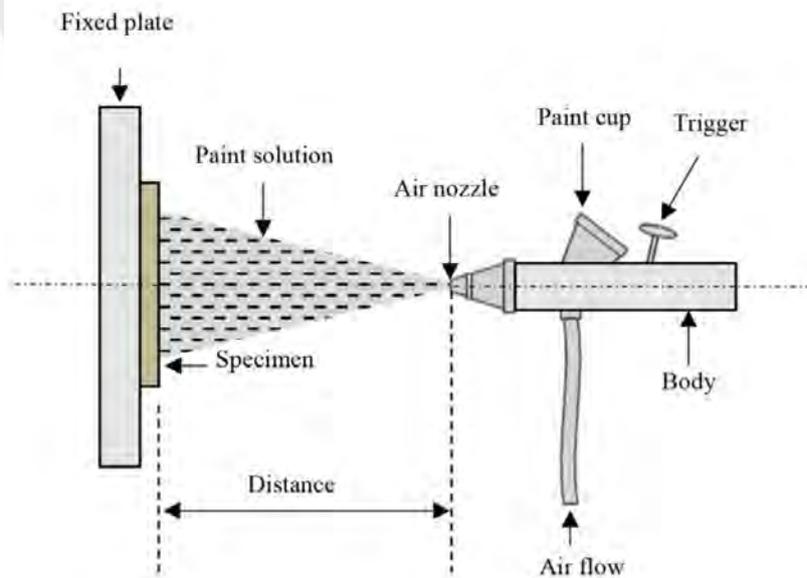


Figura 17. Técnica de aplicación de un patrón espectrométrico mediante un atomizador de pintura en spray^[23].

En caso que se tengan probetas de mayor tamaño, la anterior técnica producirá puntos de tamaño muy pequeño que no suele ser ideal a causa de la limitada resolución de las cámaras, como se mencionó anteriormente. Para estos casos pueden emplearse otras técnicas como el impregnado con un cepillo con pintura negra sobre una matriz blanca, el pintado sobre un laberinto de cintas de manera que se forme un patrón aleatorio, etc. Algunas de estas técnicas se presentan en la **Figura 18**. En cualquier caso, deben cuidarse los tamaños de los elementos o puntos de cada patrón, de acuerdo a lo mencionado anteriormente. Como regla general, el patrón debe ser aleatorio, sin importar el método usado para crearlo. Además, se recomienda que las áreas cubiertas por pintura blanca y negra sean iguales en cantidad [12].



Figura 18. Conjunto de técnicas para crear un patrón espectrométrico. Izquierda: Usando un cepillo impregnado de pintura. Superior derecha: Uso de un lápiz con trazo libre. Inferior derecha: uso de cinta para tapar la superficie para el posterior uso de pintura con atomizador sobre dicha superficie [12].

El tamaño de la probeta también varía según el material que se desea ensayar. Para que el ensayo realizado tenga validez de una norma se requiere que se sigan los tamaños de probeta definidos para cada norma en cada probeta. Asimismo, existen materiales que tienen mayor sensibilidad a fuerzas secundarias que aparezcan en el ensayo de tracción que limiten el tamaño de la probeta a manera de minimizar dichas fuerzas. Por otro lado, existen materiales que se deformen menos que otros, lo que influencia que el tamaño de la probeta deba aumentar para que la deformación sea más fácil observar a través del software. Finalmente, continuando esta última idea, en probetas donde la falla no sea muy obvia, por ejemplo en materiales de fibras reforzando resinas, se debería aumentar el tamaño de la probeta para que la falla pueda ser fácilmente identificable y esto facilite el análisis de datos al comparar la falla observada en la vida real con las deformaciones observadas por la técnica DIC en el software que se use [12].

3.3. Sujeción de la probeta

La manera de sujetar la probeta está influenciada por el material que se desea ensayar. Existen diversas aplicaciones de mordaza dependiendo de qué tan resistente sea el material, que tan sensible a la presión de las mordazas sea, etc. En la **Figura 19** se presenta un ejemplo comparativo de aplicaciones de diversos tipos de sujeciones (mordazas) para cada material que se pueda ensayar.

Characteristics/Features		Specimen grips (Function principle)							
		Screw-	Spring loaded-	Pneumatic-	Hydraulic-	Wedge-	Wedge screw-	Pincer-	Toggle-
									
Size (max. test load)									
	Smallest version [kN]	0.02	0.02	0.02	10	2.5	0.5	0.5	0.3
	Largest version [kN]	50	0.05	100	2000	600	250	10	2.5
Temperature range									
	Lower limit [°C]	-70	-15	-70	-70	-70	-40	-40	-15
	Upper limit [°C]	+250	+80	+250	+250	+250	+250	+250	+80
Main range of application									
	Plastics								
	Sheets, strips	✓	✓	✓	-	-	-	-	✓
	Tapes	✓	-	✓	✓	-	-	-	-
	Monofilament	-	-	✓	✓	✓	-	-	-
	Strings, ropes	✓	-	✓	-	-	-	-	-
	Dumbbells	✓	-	✓	✓	✓	✓	✓	-
	Metal								
	Foils	✓	-	✓	-	-	✓	✓	-
	Sheets, thin sheets	✓	-	✓	✓	✓	✓	✓	-
	Wires, fine wires	✓	✓	✓	✓	✓	✓	-	-
	Strips	✓	-	✓	✓	✓	✓	-	-
	Pipes	✓	-	✓	✓	✓	✓	-	-
	Dumbbells	✓	-	✓	✓	✓	✓	-	-
	Flat specimens	✓	-	✓	✓	✓	✓	✓	-
	Round specimens	✓	-	✓	✓	✓	✓	-	-
	Profiles	-	-	-	✓	-	-	-	-
	Textiles								
	Filaments, fine yards	✓	✓	-	-	-	-	-	-
	Elastic yarns	-	✓	-	-	-	-	-	-
	General yarn	✓	-	✓	-	-	-	-	-
	Technical yarn	-	-	✓	-	-	-	-	-
	Non-woven fabrics	✓	-	✓	✓	-	-	-	✓
	General fabric	✓	-	✓	✓	-	-	-	-
	Technical fabrics	-	-	✓	✓	-	-	-	-
	Geo-fabrics	-	-	-	✓	-	-	-	-
	String, ropes	-	-	✓	-	-	-	-	-
	Cordage, conveyor belts	✓	-	✓	✓	✓	✓	✓	-

Figura 19. Ejemplo de criterios de selección de mordaza según el material de ensayo. Fuente: <https://www.zwickroell.com/>

[/media/files/sharepoint/vertriebsdoku_br/04_745_specimen_grips_and_test_tools_fp_en.pdf](https://www.zwickroell.com/media/files/sharepoint/vertriebsdoku_br/04_745_specimen_grips_and_test_tools_fp_en.pdf)

La elección de algún tipo de sujeción tiene influencia en la técnica DIC. Algunas mordazas permiten un deslizamiento relativo entre ellas, aunque esto deba minimizarse, por lo tanto, se debe considerar esto al elegir la resolución espacial necesaria para la probeta. Un ejemplo de esto es el uso de una mordaza tipo cuña (**Figura 20**), la cual, debido a su geometría, puede tener un deslizamiento mínimo en caso las superficies no tengan suficiente fricción entre ellas. Asimismo, algunos tipos de mordazas pueden incrementar la concentración de esfuerzos en algunas zonas del material, lo que quita uniformidad a las deformaciones en esas regiones. Estas deformaciones no deseadas

se pueden solucionar al momento de seleccionar parámetros como tamaño de faceta y paso de la misma, de manera que se puedan obviar deformaciones locales en las zonas donde estas se generan por efecto de las mordazas seleccionadas [12].



Figura 20. Mordaza tipo cuña. Fuente: https://www.zwickroell.com/-/media/files/sharepoint/vertriebsdoku_br/04_745_specimen_grips_and_test_tools_fp_en.pdf

Otro aspecto a considerar es el uso de pestañas en algunos materiales. Estas pestañas sirven para que las mordazas se puedan sujetar a estas en vez de al material de ensayo, si se desea que la mordaza no esté en contacto directo con el material de ensayo. Esto puede ser debido a que el material de ensayo es poco resistente o tienda a fallar fácilmente. Estas pestañas transfieren la fuerza al material de ensayo en la probeta por medio de fricción entre estas pestañas y la probeta, y se suelen unir con algunas clases de pegamento. Si bien las pestañas apoyan a que el material base no se dañe por contacto con las mordazas, estas pueden crear concentradores de esfuerzo, para lo que se deben ajustar los parámetros ya mencionados en el párrafo anterior [12].

CAPÍTULO 4: REQUERIMIENTOS POR MATERIAL Y NORMAS DE ENSAYO

4.1. Requerimientos para acero estructural

4.1.1. Requerimientos del comportamiento del acero estructural

El acero estructural suele tener una ductilidad relativamente alta. Debido a esto es que tiene una forma de falla dúctil, con esfuerzo de fluencia fácilmente diferenciable de su esfuerzo último, como se observa en la curva esfuerzo-deformación unitaria de la **Figura 21**. Debido a que se tiene una larga deformación en el acero, es recomendable que se considere una probeta de tamaño relativamente pequeño, que permita una deformación de alrededor de 20% adicional sobre la longitud inicial de la probeta sin que choque con algún elemento del equipo de tracción (lo que podría ocurrir si la deformación de la probeta fuera excesiva). Adicionalmente, se debe aumentar la velocidad de ensayo y disminuir la tasa de fotogramas proporcional a dicha velocidad para evitar que se tengan demasiadas imágenes que procesar en el ensayo de tracción, lo que resultaría en tiempos de procesamiento muy elevados [24].

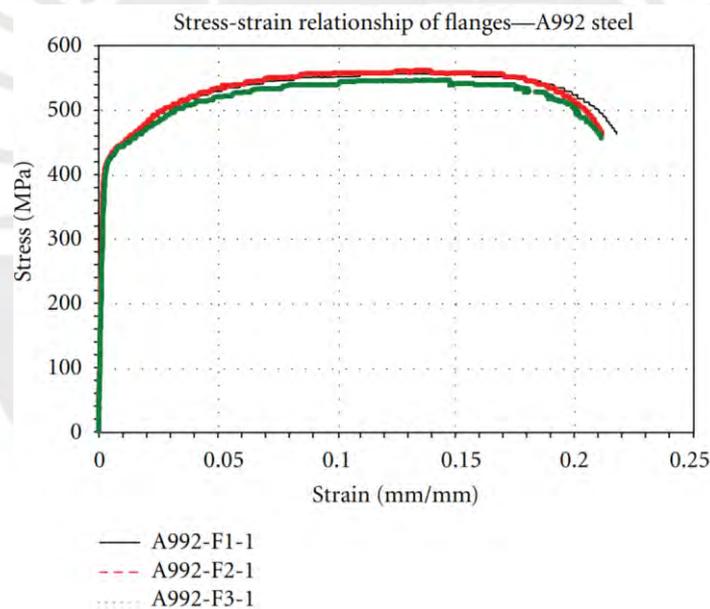


Figura 21. Ejemplo de curva esfuerzo- deformación unitaria en tres probetas de acero ASTM A992 [24].

Adicionalmente, se nota que la deformación es uniforme en el inicio hasta una fase intermedia en la zona plástica en donde aparece un cuello en la probeta. Esto genera que la deformación en la probeta ya no sea uniforme y sea más difícil para la técnica DIC captar sus deformaciones hacia el final del ensayo, para lo cual puede ser útil emplear un tamaño y paso de faceta elevados [24].

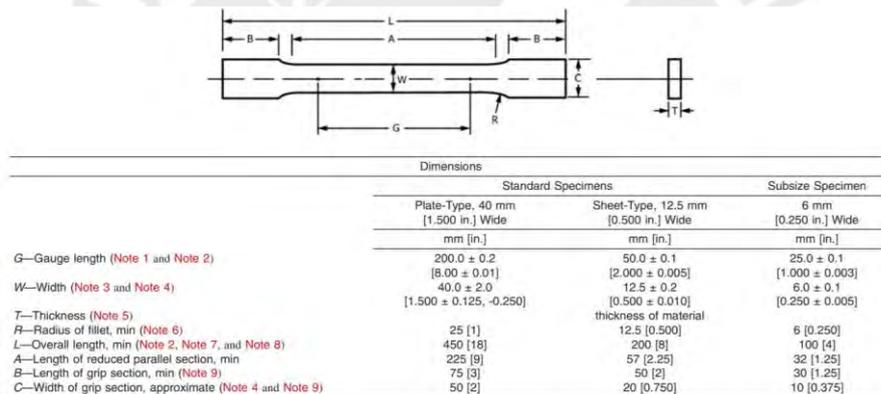
4.1.2. Requerimientos de norma ASTM E8: Ensayos de tracción en metales

Las condiciones ambientales y de instrumentación que esta norma considera son temperaturas de entre 10° a 38° y que se deben usar extensómetros calibrados para medir las deformaciones previstas de acuerdo al material a estudiar y que estén de acuerdo a la norma ASTM E8 [25].

Como recomendación al preparar el ensayo, al momento de poner la probeta en las mordazas, se debe colocar la probeta en estas lo más alineado posible con el eje imaginario que une ambas mordazas para prevenir algún deslizamiento no deseado y evitar que aparezcan esfuerzos de flexión que perjudicarían los resultados del ensayo realizado. Además, se recomienda que la probeta sea moleteada en las zonas donde se sujetan las mordazas [25].

La probeta de acero debe ser totalmente maquinada, cuidándose de realizar trabajo en frío sobre la probeta, y se velando que su eje quede centrado al ser sujeto a tracción axial. También debe preservarse que no se fileteen las esquinas para evitar perder área en la sección transversal, que es algo que ocasionaría errores de cálculo. Si la superficie resultante tiene un mal acabado al maquinar, se debe descartar dicha probeta y fabricar otra [25].

Se dispondrá la probeta tipo platina con ancho de 40 mm, con sus medidas presentadas en la **Figura 22**, y se escogerá un espesor, largo y longitud de la sección reducida de 10, 500 y 250 mm respectivamente.



NOTE 1—For the 40 mm [1.500 in.] wide specimen, punch marks for measuring elongation after fracture shall be made on the flat or on the edge of the specimen and within the reduced parallel section. Either a set of nine or more punch marks 25 mm [1 in.] apart, or one or more pairs of punch marks 200 mm [8 in.] apart may be used.

NOTE 2—When elongation measurements of 40 mm [1.500 in.] wide specimens are not required, a minimum length of reduced parallel section (A) of 75 mm [2.25 in.] may be used with all other dimensions similar to those of the plate-type specimen.

NOTE 3—For the three sizes of specimens, the ends of the reduced parallel section shall not differ in width by more than 0.10, 0.05 or 0.02 mm [0.004, 0.002 or 0.001 in.], respectively. Also, there may be a gradual decrease in width from the ends to the center, but the width at each end shall not be more than 1 % larger than the width at the center.

NOTE 4—For each of the three sizes of specimens, narrower widths (W and C) may be used when necessary. In such cases the width of the reduced parallel section should be as large as the width of the material being tested permits; however, unless stated specifically, the requirements for elongation in a product specification shall not apply when these narrower specimens are used.

NOTE 5—The dimension T is the thickness of the test specimen as provided for in the applicable material specifications. Minimum thickness of 40 mm [1.500 in.] wide specimens shall be 5 mm [0.188 in.]. Maximum thickness of 12.5 and 6 mm [0.500 and 0.250 in.] wide specimens shall be 19 and 6 mm [0.750 and 0.250 in.], respectively.

NOTE 6—For the 40 mm [1.500 in.] wide specimen, a 13 mm [0.500 in.] minimum radius at the ends of the reduced parallel section is permitted for steel specimens under 690 MPa [100 000 psi] in tensile strength when a profile cutter is used to machine the reduced section.

NOTE 7—The dimension shown is suggested as a minimum. In determining the minimum length, the grips must not extend in to the transition section between Dimensions A and B, see Note 9.

NOTE 8—To aid in obtaining axial force application during testing of 6-mm [0.250-in.] wide specimens, the overall length should be as large as the material will permit, up to 200 mm [8.00 in.].

NOTE 9—It is desirable, if possible, to make the length of the grip section large enough to allow the specimen to extend into the grips a distance equal to two thirds or more of the length of the grips. If the thickness of 12.5 mm [0.500-in.] wide specimens is over 10 mm [0.375 in.], longer grips and correspondingly longer grip sections of the specimen may be necessary to prevent failure in the grip section.

NOTE 10—For the three sizes of specimens, the ends of the specimen shall be symmetrical in width with the center line of the reduced parallel section within 2.5, 1.25 and 0.13 mm [0.10, 0.05 and 0.005 in.], respectively. However, for referee testing and when required by product specifications, the ends of the 12.5 mm [0.500 in.] wide specimen shall be symmetrical within 0.2 mm [0.01 in.].

NOTE 11—For each specimen type, the radii of all fillets shall be equal to each other within a tolerance of 1.25 mm [0.05 in.], and the centers of curvature of the two fillets at a particular end shall be located across from each other (on a line perpendicular to the centerline) within a tolerance of 2.5 mm [0.10 in.].

NOTE 12—Specimens with sides parallel throughout their length are permitted, except for referee testing, provided: (a) the above tolerances are used; (b) an adequate number of marks are provided for determination of elongation; and (c) when yield strength is determined, a suitable extensometer is used. If the fracture occurs at a distance of less than 2 W from the edge of the gripping device, the tensile properties determined may not be representative of the material. In acceptance testing, if the properties meet the minimum requirements specified, no further testing is required, but if they are less than the minimum requirements, discard the test and retest.

Figura 22. Tipos de probetas y medidas de estas en probetas con forma de platina o lámina usadas según norma ASTM E8 [25].

Sobre la longitud de sección reducida se deben hacer marcas de punzón o con tinta cada 25 mm para poder medir la elongación. Además, debe marcarse con un plumón los dos extremos de la longitud calibrada la cual es de $200 \pm 0,2$ mm. En caso que las medidas no concuerden se deberá fabricar y reemplazar la probeta defectuosa. Entonces, la probeta tendrá las siguientes medidas:

$$\begin{aligned} \text{Largo (total)} &= 500 \text{ mm} \\ \text{Longitud de la sección reducida} &= 250 \text{ mm} \\ \text{Longitud calibrada} &= 200 \pm 0.2 \text{ mm} \\ \text{Longitud de sujeción por mordaza (medida desde cada extremo)} &= 100 \text{ mm} \\ \text{Ancho (en la sección reducida)} &= 40 \text{ mm} \\ \text{Ancho (en la zona de sujeción por mordazas)} &= 50 \text{ mm} \\ \text{Espesor} &= 10 \text{ mm} \end{aligned}$$

El procedimiento previo al ensayo comienza al llevar al equipo de tracción a sus condiciones de trabajo. Luego se procede a medir la sección de la probeta en el medio de la longitud de menor espesor. El micrómetro debe medir el ancho y espesor al 0,02 mm más cercano. Por otro lado, el equipo de tracción debe calibrarse de modo que el estado de fuerzas nula medido por el equipo corresponde a un estado de fuerzas nulas en la probeta; además, no se debe anular el efecto de precarga con medios artificiales. Al momento de ubicar las probetas en las mordazas debe asegurarse que estas no pasen de la región de sección transversal agrandada hacia la zona de transición del área de sección reducida. La velocidad del ensayo se medirá en la máquina en mm/min y con esta velocidad nos referimos a la velocidad que se mueve una mordaza respecto de la otra ("crosshead speed"). De acuerdo a la norma ASTM A36 el esfuerzo a la fluencia debería ser 250 MPa y el esfuerzo último debe ser de entre 400 y 550 MPa. Por lo tanto, de acuerdo con la norma ASTM D8 se procederá con una velocidad de 10mm/min hasta que se llegue a medir 100 MPa en la probeta (un cuarto del mínimo esfuerzo último posible). Para conocer la velocidad a usarse el resto de la prueba se procederá a usar en estándar de control tipo C de la norma ASTM E8. Para ello se calculará la velocidad de ensayo usando una tasa de deformación entre mordazas de 0,015 (mm/mm)/min y considerando la longitud de la sección reducida inicial de la probeta, entonces:

$$\begin{aligned} \text{Longitud inicial de la probeta} &= 350 \text{ mm} \\ \text{Velocidad de ensayo} &= \text{Tasa de deformación} \times \text{Longitud inicial de la probeta} \\ \text{Velocidad de ensayo} &= 0,015 \times 350 \\ \text{Velocidad de ensayo} &= 5,25 \text{ mm/min} \end{aligned}$$

Por lo tanto, se usará una velocidad de ensayo de 5,25 mm/min a partir de los 100 MPa medidos por el ensayo. Se procederá con el ensayo hasta que la probeta rompa. En caso de algún desperfecto o que algún procedimiento se haya hecho incorrectamente se deberá repetir el ensayo con una nueva probeta para cumplir con la norma ASTM E8.

Para calcular el esfuerzo de fluencia mediante el método offset [25] se siguen los siguientes pasos (**Figura 23**):

- Consigue la curva esfuerzo-elongación
- Se identifica un punto "m" en el eje horizontal correspondiente a un 0,002 de elongación.
- Se traza una línea OA siguiendo la zona lineal de la curva esfuerzo-elongación.
- Se traza una línea "mn" paralela a OA empezando por el punto "m"

- Se identifica el punto "r" que es el cruce de la línea "mn" con la curva esfuerzo-elongación, del cual se lee el esfuerzo de fluencia.
- Se presenta el esfuerzo de la siguiente manera:

$$\text{Esfuerzo de fluencia (offset} = 0,2\%) = "r" \text{ MPa}$$

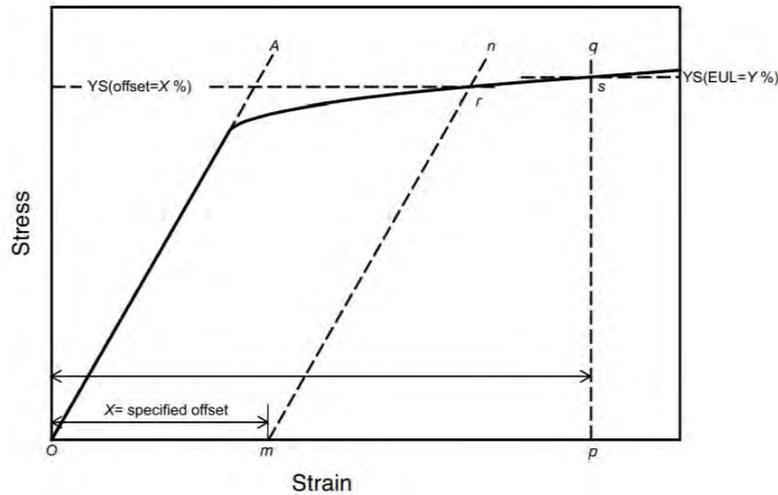


Figura 23. Curva esfuerzo elongación mostrando el método "offset" para medir el esfuerzo de fluencia según ASTM E8

Con el fin de calcular la elongación del punto de fluencia se medirá la diferencia entre las elongaciones en el esfuerzo superior de fluencia y el punto de reinicio de la deformación plástica. El esfuerzo superior de fluencia es el primer pico de pendiente cero, y el punto de reinicio de la deformación es la intersección entre la tangente del punto de inflexión previo al reinicio de la deformación plástica y la tangente horizontal al último punto de inflexión durante la fluencia (**Figura 24**). En caso de que el material no muestre una fluencia discontinua no se podrá calcular la elongación del punto de fluencia.

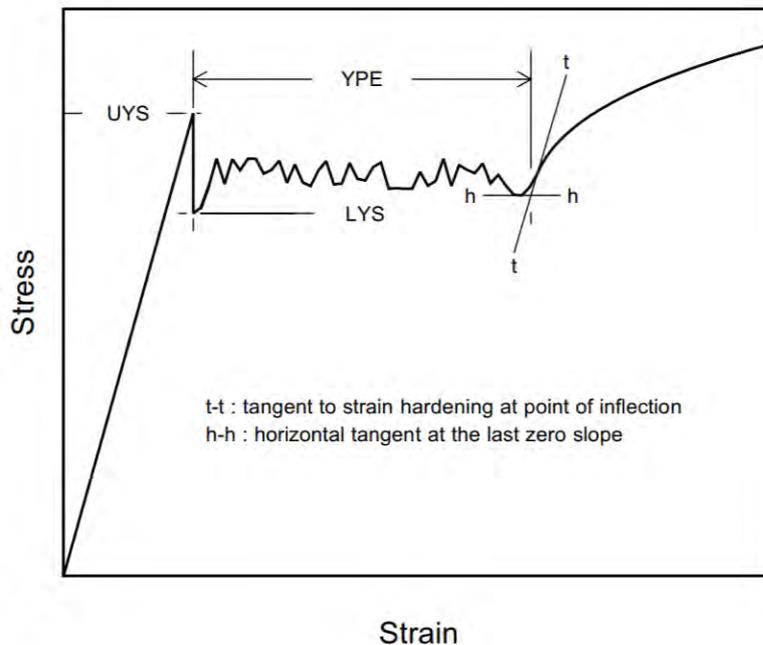


Figura 24. Curva esfuerzo elongación. UYS: esfuerzo superior de fluencia, LYS: esfuerzo inferior de fluencia, Elongación del punto de fluencia^[25].

Adicionalmente, para el cálculo de la elongación uniforme se incluyen las deformaciones elásticas y plásticas. Esta elongación uniforme es la elongación medida en el punto de fuerza máxima (siempre en la región plástica, ignorando el máximo de la región elástica o de fluencia en caso la máxima fuerza ocurriese en dicha región). En caso la curva en la región plástica llegue a una máxima fuerza a lo largo de una meseta grande, se considerará la elongación máxima en el centro de lo abarcado por dicha meseta en la curva.

Al momento de calcular el esfuerzo último a la tracción se usará el área inicial de la sección de la probeta (calculada anteriormente) y se dividirá la máxima fuerza medida entre dicha área:

$$\text{Esfuerzo último a la tracción} = \frac{\text{Fuerza máxima medida}}{\text{Área inicial de la sección}}$$

Debe notarse que, si es que la fuerza medida en la fluencia es la mayor fuerza medida, se debe tomar la mayor fuerza medida en la región de comportamiento plástico, pero debe indicarse que se realizó este artificio al momento de presentar el valor el esfuerzo ultimo a la tracción.

Para el valor de elongación se medirá este valor antes de la fractura. Este valor se toma en el momento que la fuerza decrezca súbitamente. Si la fractura ocurriese fuera de la longitud calibrada o dentro de esta, pero a un 25% (en términos de longitud calibrada) de una de las dos marcas al extremo de la longitud calibrada, se debe repetir el ensayo. Se debe reportar este valor de la siguiente forma:

$$\text{Elongación} = "x" \% \text{ de aumento ("y" mm de longitud caibrada)}$$

Todos los valores de esfuerzo calculados anteriormente deben redondearse. Si es que el valor es menor o igual a 500 MPa se redondeará al 1 MPa más cercano, si fuese superior a ese valor y hasta 1000 MPa se debe redondear a los 5 MPa más cercanos, y si fuese mayor a 1000Mpa se deberá redondear a los 10 MPa más cercanos.

Finalmente y para recapitular, se deben reportar siguientes resultados y datos del experimento, según norma ASTM E8:

- Material (tipo, origen, código, dimensiones y especificaciones del fabricante).
- Tipo de probeta usada según norma ASTM E8.
- Velocidad de ensayo y método para determinar dicha velocidad.
- Esfuerzo de fluencia y el método de hallarlo (método offset).
- Elongación del punto de fluencia.
- Esfuerzo último a la fluencia.
- Elongación e incluir longitud calibrada, incremento porcentual y el método empleado para medir la elongación (en este caso antes de la fractura).
- Elongación uniforme.
- Método empleado para redondear resultados (explicado anteriormente)
- Razones para el reemplazo de probetas (en caso ocurra).
- Fecha de ensayo
- Versión de la norma ASTM E8 empleada

4.2. Requerimientos para ABS

4.2.1. Requerimientos del comportamiento del ABS

El ABS suele tener un comportamiento más frágil a la tensión y no forma algún cuello significativo, como se observa en la **Figura 25**. Debido a ello, la probeta deberá ser relativamente grande, para que se puedan observar con mayor claridad las deformaciones no tan grandes que presenta en tracción. Adicionalmente, se puede aumentar la tasa de fotogramas para poder tener más información sobre la deformación de la probeta. En términos de tamaño y paso de faceta se pueden tomar valores pequeños, debido a que la deformación resulta más uniforme a lo largo del ensayo.



Figura 25. Ejemplo de comportamiento a tracción de una probeta de ABS. Fuente: <https://www.shimadzu.com/an/industry/petrochemicalchemical/n9j25k00000dmyx5.html>

Por otro lado, al observar la curva esfuerzo-deformación unitaria de este material (**Figura 26**), se puede constatar que tiene una región elástica y una forma constante a diferentes tasas de deformación, pero con valores que varían considerablemente de acuerdo a la tasa de deformación escogida. Debido a esto se debe ser claro al mencionar este parámetro al momento de realizar el ensayo, de modo que se explique la diferencia de otras curvas desarrolladas a diferentes tasas de deformación [26].

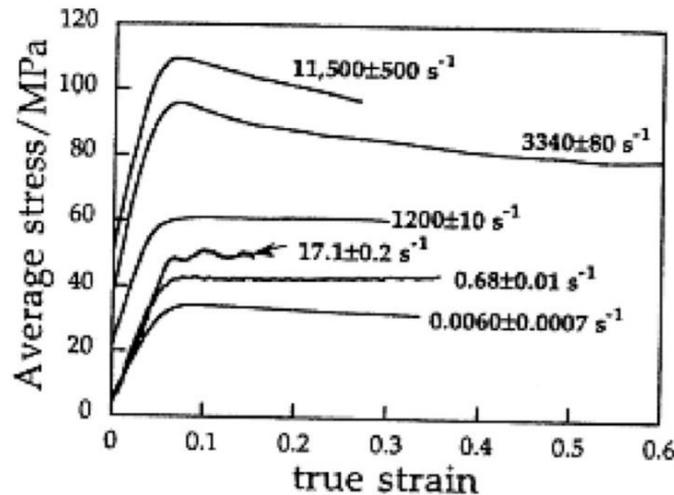


Figura 26. Curva esfuerzo-deformación unitaria en ABS para diferentes tasa de deformación [26].

4.2.2. Requerimientos de la norma ASTM D638: Ensayos de tracción en polímeros

La instrumentación incluye mordazas que deben tener un moleteado; para termoplásticos (el ABS es uno de ellos) se recomienda que este tenga un espaciamiento de 2,4 mm y una profundidad de 1,6 mm. Sin embargo, los moleteados con menor espaciamiento se recomiendan para plásticos más duros (termoestables). Se debe dejar de usar mordazas moleteadas en caso de que la probeta se rompa dentro del área de las mordazas y, en su defecto, optar por el uso de otras técnicas, como pueden ser la aplicación de abrasión entre las superficies en contacto de la probeta o interponer papel abrasivo entre esta y la mordaza. Para este último caso se ha recomendado el uso de papel abrasivo N°80, mientras otra opción puede ser reducir la sección de la probeta.

En el caso de que se usen extensómetros para medir módulos de elasticidad se requiere que dicho aparato tenga un error de medición de la tasa de elongación menor a 0,0002 mm/mm. Según la norma ASTM E83, esto corresponde a una clasificación B-2 en términos de uso para mediciones de módulos de elasticidad. Por último, deben ubicarse en ambos extremos de la longitud calibrada (o parámetro G de la **Figura 27**). Para mediciones de elongación (deformación unitaria) mayores al 20%, el extensómetro debe requerir al menos clase C según la norma ASTM E83. Esto incluye un error de medición en la tasa de elongación menor a 0,001 o $\pm 1,0\%$ de la elongación indicada (lo que sea mayor).

Se debe seleccionar una forma de probeta, de las cuales se prefiere el tipo 3 con sus respectivas medidas, según norma ASTM D638 (**Tabla 2**); esta decisión se basa en el conocimiento que este material no deforma mucho y una probeta más grande ayudaría a la técnica DIC a captar mejor las deformaciones. Por ende, la probeta tendrá las siguientes medidas:

Largo (total) = 500 mm
Longitud de la sección reducida = 57 mm
Ancho (en la sección reducida) = 19 mm
Ancho (en la zona de sujeción por mordazas) = 35 mm
Espesor = 10 mm
Distancia entre mordazas = 115 mm

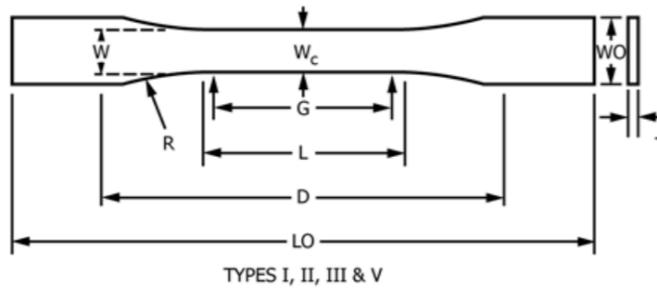


Figura 27. Variables de las medidas recomendadas de probetas tipo I, II, III y IV, según la norma ASTM D638

Dimensions (see drawings)	Specimen Dimensions for Thickness, T , mm (in.) ^A					Tolerances
	7 (0.28) or under		Over 7 to 14 (0.28 to 0.55), incl	4 (0.16) or under		
	Type I	Type II	Type III	Type IV ^B	Type V ^{C,D}	
W —Width of narrow section ^{E,F}	13 (0.50)	6 (0.25)	19 (0.75)	6 (0.25)	3.18 (0.125)	± 0.5 (± 0.02) ^{B,C}
L —Length of narrow section	57 (2.25)	57 (2.25)	57 (2.25)	33 (1.30)	9.53 (0.375)	± 0.5 (± 0.02) ^C
WO —Width overall, min ^G	19 (0.75)	19 (0.75)	29 (1.13)	19 (0.75)	...	+ 6.4 (+ 0.25)
WO —Width overall, min ^G	...	...	...	...	9.53 (0.375)	+ 3.18 (+ 0.125)
LO —Length overall, min ^H	165 (6.5)	183 (7.2)	246 (9.7)	115 (4.5)	63.5 (2.5)	no max (no max)
G —Gage length ^I	50 (2.00)	50 (2.00)	50 (2.00)	...	7.62 (0.300)	± 0.25 (± 0.010) ^C
G —Gage length ^I	...	...	...	25 (1.00)	...	± 0.13 (± 0.005)
D —Distance between grips	115 (4.5)	135 (5.3)	115 (4.5)	65 (2.5) ^J	25.4 (1.0)	± 5 (± 0.2)
R —Radius of fillet	76 (3.00)	76 (3.00)	76 (3.00)	14 (0.56)	12.7 (0.5)	± 1 (± 0.04) ^C
RO —Outer radius (Type IV)	...	...	...	25 (1.00)	...	± 1 (± 0.04)

^AThickness, T , shall be 3.2 ± 0.4 mm (0.13 ± 0.02 in.) for all types of molded specimens, and for other Types I and II specimens where possible. If specimens are machined from sheets or plates, thickness, T , shall be the thickness of the sheet or plate provided this does not exceed the range stated for the intended specimen type. For sheets of nominal thickness greater than 14 mm (0.55 in.) the specimens shall be machined to 14 ± 0.4 mm (0.55 ± 0.02 in.) in thickness, for use with the Type III specimen. For sheets of nominal thickness between 14 and 51 mm (0.55 and 2 in.) approximately equal amounts shall be machined from each surface. For thicker sheets both surfaces of the specimen shall be machined, and the location of the specimen with reference to the original thickness of the sheet shall be noted. Tolerances on thickness less than 14 mm (0.55 in.) shall be those standard for the grade of material tested.

^BFor the Type IV specimen, the internal width of the narrow section of the die shall be 6.00 ± 0.05 mm (0.250 ± 0.002 in.). The dimensions are essentially those of Die C in Test Methods D412.

^CThe Type V specimen shall be machined or die cut to the dimensions shown, or molded in a mold whose cavity has these dimensions. The dimensions shall be:

$W = 3.18 \pm 0.03$ mm (0.125 ± 0.001 in.),
 $L = 9.53 \pm 0.08$ mm (0.375 ± 0.003 in.),
 $G = 7.62 \pm 0.02$ mm (0.300 ± 0.001 in.), and
 $R = 12.7 \pm 0.08$ mm (0.500 ± 0.003 in.).

The other tolerances are those in the table.

^DSupporting data on the introduction of the L specimen of Test Method D1822 as the Type V specimen are available from ASTM Headquarters. Request RR:D20-1038.

^EThe tolerances of the width at the center W_c shall be $+0.00$ mm, -0.10 mm ($+0.000$ in., -0.004 in.) compared with width W at other parts of the reduced section. Any reduction in W at the center shall be gradual, equally on each side so that no abrupt changes in dimension result.

^FFor molded specimens, a draft of not over 0.13 mm (0.005 in.) is allowed for either Type I or II specimens 3.2 mm (0.13 in.) in thickness. See diagram below and this shall be taken into account when calculating width of the specimen. Thus a typical section of a molded Type I specimen, having the maximum allowable draft, could be as follows:

^GOverall widths greater than the minimum indicated are used for some materials in order to avoid breaking in the grips.

^HOverall lengths greater than the minimum indicated are used for some materials to avoid breaking in the grips or to satisfy special test requirements.

^ITest marks or initial extensometer span.

^JWhen self-tightening grips are used, for highly extensible polymers, the distance between grips will depend upon the types of grips used and may not be critical if maintained uniform once chosen.

Tabla 2. Tabla de medidas de las variables de las probetas de tipo I, II, III, IV y V, según la norma ASTM D638

La norma ASTM D638 permite que sea maquinada, inyectada en molde o troquelada. Sin embargo, debe considerarse que al usar la técnica de inyección por molde se pueden tener propiedades mecánicas distintas a las que se obtendrían usando los otros dos métodos. Por ello, en el presente trabajo se considerará que las probetas se maquinarán 5 probetas por cada ensayo, siguiendo la anterior norma. Posteriormente se verificará que no existan imperfecciones visibles en la superficie de la probeta, pero de existir se deben lijar con papel abrasivo (de preferencia N°00 o más fino) en el sentido del eje longitudinal de la probeta. Luego se marcará con crayón la longitud calibrada en ambos extremos. Si alguna probeta se rompiera en algún defecto del material o fuera de la zona de sección reducida se deberá descartar su resultado.

La selección de la velocidad de ensayo se basa en la **Tabla 3**. Se considera al ABS como un material rígido por lo cual se elegirá una velocidad de $5 \pm 1,25$ mm/min. Además, se seleccionará la tasa de deformación al inicio del ensayo, para lo que elegirá

el menor valor que logre generar la ruptura del material en un tiempo entre 0,5 y 5 minutos, es decir se empezará con una velocidad de 3,75 mm/min; en caso no romper en el tiempo adecuado, se procederá con incrementos de 0,25 mm/min hasta lograr el tiempo deseado.

TABLE 1 Designations for Speed of Testing^A

Classification ^B	Specimen Type	Speed of Testing, mm/min (in./min)	Nominal Strain ^C Rate at Start of Test, mm/mm·min (in./in.·min)
Rigid and Semirigid	I, II, III rods and tubes	5 (0.2) ± 25 %	0.1
		50 (2) ± 10 %	1
		500 (20) ± 10 %	10
	IV	5 (0.2) ± 25 %	0.15
		50 (2) ± 10 %	1.5
		500 (20) ± 10 %	15
	V	1 (0.05) ± 25 %	0.1
		10 (0.5) ± 25 %	1
		100 (5) ± 25 %	10
	Nonrigid	III	50 (2) ± 10 %	1
500 (20) ± 10 %			10
IV		50 (2) ± 10 %	1.5
		500 (20) ± 10 %	15

^ASelect the lowest speed that produces rupture in 0.5 to 5 min for the specimen geometry being used (see 8.2).

^BSee Terminology D883 for definitions.

^CThe initial rate of straining cannot be calculated exactly for dumbbell-shaped specimens because of extension, both in the reduced section outside the gage length and in the fillets. This initial strain rate can be measured from the initial slope of the tensile strain-versus-time diagram.

Tabla 3. Velocidad de ensayo para cada tipo de probeta según norma ASTM D638

Con el fin de obtener las condiciones ambientales adecuadas para el ensayo se sigue el procedimiento A de la norma ASTM D618. Esta norma señala que las probetas deben acondicionarse a 23±2°C y 50% de humedad relativa por 48 horas previas al ensayo dentro del laboratorio. Además, las probetas se ubicarán en posición vertical para asegurar la circulación de aire alrededor de ellas.

Para proceder al ensayo se usarán de igual manera 23±2°C y 50% de humedad relativa. Posteriormente, se usará un micrómetro para medir el ancho y espesor de cada probeta al 0,025 mm más cercano en el centro de la probeta y en cada extremo de la longitud calibrada ±5mm; este micrómetro deberá tener un dedal de fricción. Se deberá aplicar una presión de 100 ±50 KPa sobre la probeta al momento de medir, de acuerdo con la norma ASTM D5947; además, se procederá a hallar 3 áreas en las tres zonas de la probeta de donde se tomaron las medidas y se hallará un área promedio de la sección usando estos tres valores hallados.

A continuación, se colocará la probeta en las mordazas, con cuidado de poner la probeta en las mordazas lo más alineado con el sentido del eje imaginario que une ambas mordazas para prevenir algún deslizamiento relativo entre la mordaza y la probeta. La distancia entre mordazas debe elegirse de acuerdo a la **Figura 27**; en este caso, considerando el uso de la probeta tipo 1, se seleccionará una distancia entre mordazas de 115 mm. Después se ajustarán las mordazas lo necesario para no dejar que haya deslizamiento; luego se acoplará el extensómetro. Por otro lado, si es que se desea efectuar mediciones referidas al módulo de elasticidad se deberán considerar los requerimientos previos necesarios. Se establece la velocidad de ensayo previamente elegida en el equipo de tracción y se empezará a aplicar la fuerza. Se registrarán la curva fuerza-deformación, los valores de fuerza y deformación en los puntos de fluencia y ruptura.

Se debe realizar lo que se denomina como “toe compensation”. Para ello se prolonga la región elástica (CD) y se considera como inicio de la curva al punto “B” en vez de al punto “A”, como se muestra en la **Figura 28**. Todo cálculo posterior debe considerar al punto “B” como el punto de inicio del ensayo. La curva antes mencionada se construye basándose en la curva fuerza-deformación. El esfuerzo se calcula dividiendo los valores de carga entre el área promedio, y la elongación se halla basándose en los valores del extensómetro y su cálculo se presenta más adelante.

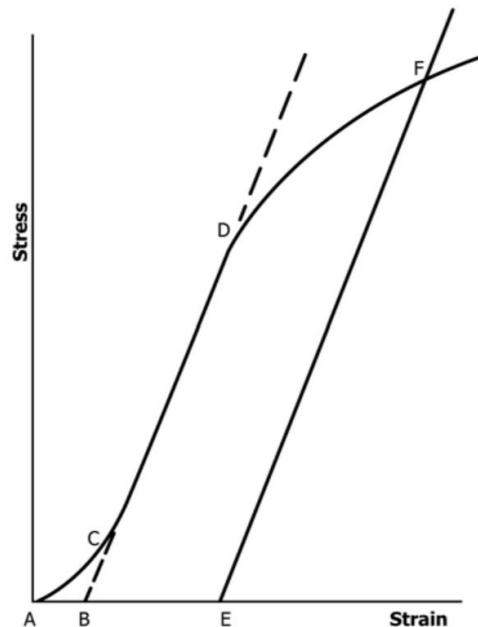


Figura 28. Curva esfuerzo - elongación mostrando los puntos A, B, C, D, E y F. Fuente: ASTM D638

Para el cálculo del esfuerzo último a la rotura se dividirá la carga máxima obtenida sobre el área promedio de la sección (hallado previamente); este resultado se debe expresar en pascuales y con 3 cifras significativas. El cálculo del esfuerzo a la fluencia (en caso de existir fluencia en el material) se hallará de la misma manera, solo cambiando la carga máxima por la carga cuando ocurre fluencia en el material.

El valor de deformación total medido por el equipo de tracción se puede tomar directamente desde el punto “B” hasta el fin de la deformación (marcada por la rotura de la probeta) en el punto “E”. Para hallar este punto “E” se debe llevar una línea paralela a la de la región lineal de la curva que pase por el punto “F” de rotura de la probeta y leerse en el eje de abscisas el correspondiente punto “E”. Similarmente, para medir elongación se usa la siguiente fórmula.

$$\text{Elongación} = \frac{\text{Deformación total}}{\text{Longitud calibrada}}$$

De forma porcentual sería:

$$\text{Elongación (\%)} = \frac{\text{Deformación total}}{\text{Longitud calibrada}} \times 100\%$$

De similar manera se puede calcular la elongación a la fluencia o a la rotura usando la anterior fórmula, pero con el siguiente cambio: en vez de la deformación total se toma la deformación desde el punto B a el punto "D" o "F", respectivamente (leyendo los valores directamente en dichos puntos). Asimismo, se emplea la fórmula anterior para calcular la deformación nominal. Para ello, en vez de usar la deformación total medida por el extensómetro, se usará la deformación entre mordazas ("crosshead movement") total al finalizar la prueba; si se desea tener la deformación nominal a la rotura se debe usar la deformación entre mordazas al momento de la rotura. Para el cálculo del módulo de elasticidad se calculará la pendiente de la curva esfuerzo-elongación. Se tomarán los siguientes valores:

$$\begin{aligned} \sigma_{fluencia} &: \text{Esfuerzo a la fluencia} \\ \varepsilon_{fluencia} &: \text{Elongación a la fluencia} \\ E &: \text{Módulo de elasticidad} \\ E &= \sigma_{fluencia} / \varepsilon_{fluencia} \end{aligned}$$

Los cálculos anteriores se aplicarán a cada una de las probetas. Además, para cada variable debe calcularse el promedio aritmético y desviación estándar entre los resultados de las probetas ensayadas y presentarse el promedio como resultado del ensayo de tracción. Se usarán las fórmulas presentadas a continuación:

$$\begin{aligned} X &: \text{Variable (ejemplo: elongación, esfuerzo máximo, etc)} \\ X_i &: \text{Valor de la variable en la probeta "i"} \\ \underline{X} &: \text{Promedio aritmético de la variable "X"} \\ n &: \text{número de probetas ensayadas} \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} \underline{X} &= \frac{\sum_i X_i}{n} \\ s &: \text{Desviación estándar} \\ s &= \sqrt{\frac{(\sum_i X_i^2 - n \times \underline{X}^2)}{(n - 1)}} \end{aligned}$$

Finalmente, se deben reportar siguientes resultados y datos del experimento, según norma ASTM D638:

- Material (tipo, origen, código y dimensiones).
- Método de preparación.
- Tipo de probeta usada según norma ASTM D638.
- Modo de acondicionamiento.
- Condiciones ambientales en el momento del ensayo.
- Velocidad de ensayo.
- Clasificación de extensómetro usado.
- Carga a la rotura o a la fluencia, con su promedio y desviación estándar.
- Esfuerzo último o a la fluencia, con su promedio y desviación estándar.
- Elongación a la rotura o fluencia (porcentualmente), o elongación a la rotura, con su promedio y desviación estándar.
- Módulo de elasticidad, con su promedio y desviación estándar.
- Fecha de ensayo
- Versión de la norma ASTM D638 usada

4.3. Requerimientos para resina epóxica con fibra de vidrio

4.3.1. Requerimientos del comportamiento de la fibra de vidrio en resina

En el caso de la fibra de vidrio se debe tener mucho cuidado con la orientación de las fibras. Como se observa en la **Figura 29**, la probeta de fibra de vidrio tiene una región lineal y una región plástica claramente definidas, mientras que en la **Figura 30** se observa un comportamiento distinto, donde la probeta falla a deformaciones mucho menores y de manera frágil. Debido a esto se debe definir la orientación de las fibras de manera clara para que se diferencie cada ensayo de manera adecuada. Lo antes mencionado para el acero y el ABS en términos del tamaño y paso de faceta también tiene efecto para este material compuesto[27]. En este caso debido a que se elegirá una probeta con fibras orientadas en el sentido longitudinal, se puede tratar al material con parámetros similares a los del acero estructural del presente trabajo.

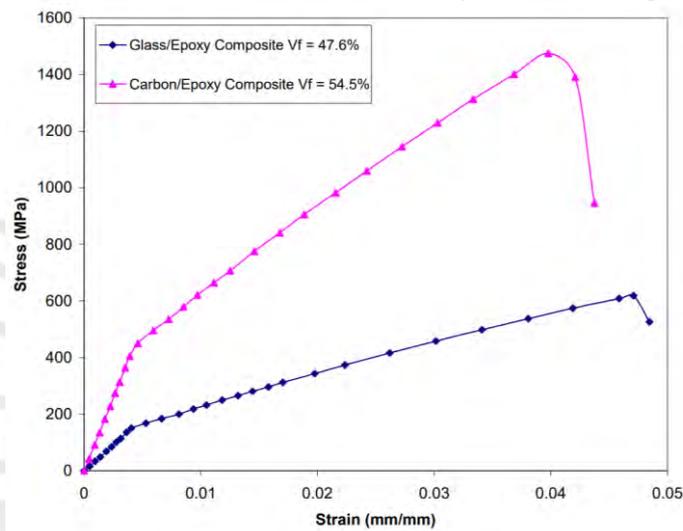


Figura 29. Curva esfuerzo-deformación unitaria de fibra de vidrio (en azul) cuando la fibra está orientada en el sentido longitudinal [27].

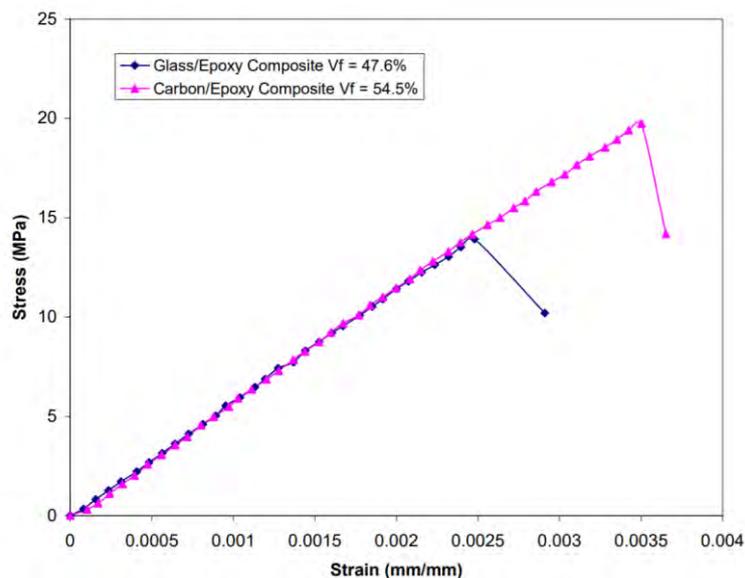


Figura 30. Curva esfuerzo-deformación unitaria de fibra de vidrio (en azul) cuando la fibra está orientada a 90° con respecto a la orientación longitudinal [27].

4.3.2. Requerimientos de la norma ASTM D3039: Propiedades de tracción en materiales de matriz polimérica

Se presentará la simbología empleada en la norma ASTM D3039 de manera referencial, en caso se consulte la misma:

- A: Área transversal promedio de una probeta.
- B_y : Porcentaje de flexión para una probeta uniaxial de sección transversal rectangular sobre el eje "y" de la probeta (sobre la dirección estrecha).
- B_z : Porcentaje de flexión para una probeta uniaxial de sección transversal rectangular sobre el eje "z" de la probeta (sobre la dirección ancha).
- CV: Coeficiente de variación de un grupo (muestra) de probetas para una propiedad dada (en porcentaje).
- E: Módulo de elasticidad en la dirección del ensayo.
- F^{tu} : Máxima resistencia a la tracción en la dirección de prueba.
- F^{su} : Máxima resistencia a corte en la dirección de prueba.
- H: Espesor de la probeta.
- L_g : Longitud calibrada del extensómetro.
- L_{min} : Longitud mínima de pestaña unida a la probeta.
- n: Número de probetas ensayadas por muestra.
- P: Fuerza experimentada por la probeta.
- P^f : Máxima fuerza experimentada por la probeta en la fractura
- P^{max} : Máxima fuerza experimentada por la probeta previo a la fractura
- s_{n-1} : Desviación estándar de un grupo de probetas (muestra) para una propiedad dada.
- w: Ancho de la probeta.
- x_i : Resultado de la prueba para una probeta individual del grupo de probetas para una propiedad determinada.
- \bar{x} : Media de los resultados de la prueba para una probeta individual del grupo de probetas para una propiedad determinada.
- δ : Desplazamiento extensional.
- ϵ : Símbolo genérico para elongación ya sea normal o de corte.
- ϵ : Elongación normal indicado de parte de un transductor de elongaciones o un extensómetro.
- σ : Esfuerzo normal
- ν : módulo de Poisson

El ensayo necesitará de una probeta de sección rectangular y espesor delgado. Esta se cargará de forma progresiva en tensión axial al mismo tiempo que se registra la fuerza aplicada. Así, el esfuerzo último se registrará usando la fuerza máxima registrada previo a la fractura. Asimismo, para conseguir curvas esfuerzo-elongación se necesita registrar la elongación en la probeta usando transductores de deformación o desplazamiento. De dichas curvas se pueden conseguir, adicionalmente, el módulo de elasticidad, el módulo de Poisson y la elongación de transición.

Para cada ensayo se deben verificar las siguientes variables ya que afectan los resultados de los ensayos a tracción:

- Método de preparación del material a emplear e instalación de la probeta en la máquina.
- Secuencia de apilamiento de probetas.

- Acondicionamiento de la probeta
- Aclimatación del ambiente.
- Alineamiento y agarre de la probeta en la máquina de tracción.
- Velocidad de ensayo.
- Tiempo y temperatura.
- Contenido de vacío.
- Porcentaje volumétrico de fibras de refuerzo.

En resumen, las propiedades que se pueden obtener por este ensayo son las siguientes:

- Esfuerzo último a la tracción.
- Elongación última a la tracción.
- Módulo de elasticidad.
- Módulo de Poisson.
- Elongación de transición.

Con el fin de tener buenos resultados en los ensayos se debe tener cuidado en la alineación de las fibras en el material, en el maquinado del mismo, en el agarre de las mordazas, en la alineación de la probeta en el eje de imaginario entre ambas mordazas y en el ángulo entre capas de la probeta a ensayar (ángulos diferentes a cero pueden mostrar propiedades mecánicas menores que los de ángulo cero).

Para tomar mediciones se usará un micrómetro con diámetro de bola entre 4 y 7mm. Estos micrómetros deben tener una precisión de 0.0025 mm. Se usará el equipo de tracción Zwick/Roell Z030, elegido de acuerdo al estándar ASTM E4.

Al momento de poner la probeta en las mordazas, se debe colocar la probeta en estas lo más alineado posible con el eje imaginario que une ambas mordazas para prevenir algún deslizamiento no deseado y evitar que aparezcan esfuerzos de flexión que perjudicarían el ensayo realizado. Además, se recomienda que la probeta sea moleteada en las zonas donde se sujetan las mordazas y que las mordazas sobresalgan 15 mm de la sección de la probeta designada para su sujeción.

a) Procedimiento previo para limitar los efectos de flexión:

La norma ASTM D3039 indica que un efecto indeseado que ocurre durante del ensayo de tracción es la inclusión de efectos de flexión, lo que ocurre por la falta de alineación del sistema. Para corroborar si la inclusión de la flexión es suficientemente baja en comparación a los efectos de tracción se usa el denominado “porcentaje de flexión”, el cual no deberá pasar de 5% y se calcula de la siguiente manera:

$$B_y = \frac{\varepsilon_{ave} - \varepsilon_3}{\varepsilon_{ave}} \times 100$$

$$B_z = \frac{2/3 \times (\varepsilon_2 - \varepsilon_1)}{\varepsilon_{ave}} \times 100$$

B_y : Porcentaje de flexión alrededor del eje “y” (es decir alrededor del plano angosto)

B_z : Porcentaje de flexión alrededor del eje “z” (es decir alrededor del plano ancho)

$\varepsilon_1, \varepsilon_2$ y ε_3 : Son las elongaciones longitudinales marcadas por las galgas extensiométricas 1,2 y 3, respectivamente a lo que se muestra en la figura 28.

$$\varepsilon_{ave} = \frac{\left(\frac{\varepsilon_1 + \varepsilon_2}{2} + \varepsilon_3\right)}{2}$$

Para conocer los parámetros ε_1 , ε_2 y ε_3 se debe usar una probeta “de alineamiento” de dimensiones iguales a la probeta a ensayarse para propiedades mecánicas. En esta se pondrán 3 galgas extensiométricas de las cuales dos estarán en una cara y la tercera estará en el lado opuesto a una misma línea horizontal (**Figura 31**). Además, dicha línea horizontal debe estar en el centro longitudinal de la probeta. Solamente en caso la probeta falle cerca a alguna mordaza se pondrán estas tres galgas cerca a la mordaza.

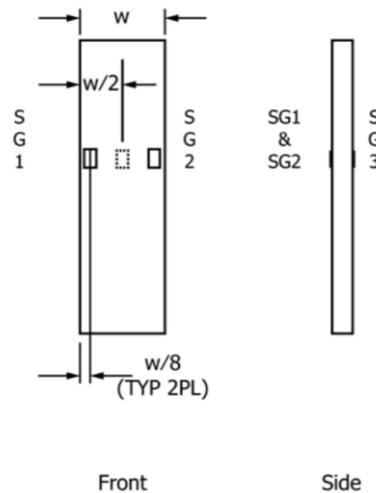


Figura 31. Probeta “de alineamiento” con la galga 1, 2 y 3 denominadas como SG1,SG2 y SG3, respectivamente.Fuente ASTM D3039

Posteriormente, se halla el valor de B_y y B_z , y se compara con el valor de referencia de 5%.; en caso no pase la prueba, es decir alguno de los porcentajes supere el 5%, se debe revisar a que se debe. Se ejecutarán los siguientes 4 pre-ensayos usando la posición de las galgas extensiométricas, pero con la probeta en 4 posiciones distintas (girando 180° en los ejes horizontal y vertical). Entonces, con dichos datos se podrá conocer si el desalineamiento es causado por fallos de alineamiento de la probeta, de las galgas o de las mordazas (o sistema de tracción). Para algún problema mayor con la alineación de la probeta se consultará la norma ASTM E1012.

b) Procedimiento de ensayo:

Para medir la deformación se usará un extensómetro, el cual debe satisfacer la clasificación B1, de acuerdo a la norma ASTM E82 y tendrá una longitud calibrada de 50 mm. Debido a que se requieren dos extensómetros para medir el módulo de elasticidad y el de Poisson según la norma ASTM D3019, no se realizarán dichas mediciones en el presente ensayo.

Para las galgas extensiométricas se usará una longitud calibrada activa de 6mm y deberán ser calibradas según el estándar ASTM E251. Al momento de pegar estas galgas a la probeta, debe consultarse al fabricante cómo lograr que no quede afectada la superficie de la probeta. Además, dichas galgas deben tener una resistencia mayor a 350 Ω y el voltaje de excitación deberá ser el menor posible.

Para el ensayo se emplearán cinco probetas y las dimensiones de estas se elegirán apoyándose en la **Tabla 4** y **Tabla 5**.

Parameter	Requirement
Coupon Requirements:	
shape	constant rectangular cross-section
minimum length	gripping + 2 times width + gage length
specimen width	as needed ^A
specimen width tolerance	±1 % of width
specimen thickness	as needed
specimen thickness tolerance	±4 % of thickness
specimen flatness	flat with light finger pressure
Tab Requirements (if used):	
tab material	as needed
fiber orientation (composite tabs)	as needed
tab thickness	as needed
tab thickness variation between tabs	±1 % tab thickness
tab bevel angle	5 to 90°, inclusive
tab step at bevel to specimen	feathered without damaging specimen

Tabla 4. Requerimientos de la probeta para el ensayo a tracción según ASTM D3039

Fiber Orientation	Width, mm [in.]	Overall Length, mm [in.]	Thickness, mm [in.]	Tab Length, mm [in.]	Tab Thickness, mm [in.]	Tab Bevel Angle, °
0° unidirectional	15 [0.5]	250 [10.0]	1.0 [0.040]	56 [2.25]	1.5 [0.062]	7 or 90
90° unidirectional	25 [1.0]	175 [7.0]	2.0 [0.080]	25 [1.0]	1.5 [0.062]	90
balanced and symmetric	25 [1.0]	250 [10.0]	2.5 [0.100]	emery cloth	—	—
random-discontinuous	25 [1.0]	250 [10.0]	2.5 [0.100]	emery cloth	—	—

Tabla 5. Recomendaciones de dimensiones según ASTM D3039

Se utilizarán pestañas en la probeta debido a que la norma ASTM E3039 lo sugiere para evitar que la fractura se produzca cerca de las mordazas. Basándose en la anterior tabla se elige la opción de probetas con fibras alineadas unidireccionales a 0° y se eligen las dimensiones de ancho y espesor de acuerdo a esa recomendación. Entonces se tienen las siguientes medidas de la probeta:

$$\text{Ancho} = 15 \text{ mm}$$

$$\text{Espesor (de la longitud calibrada)} = 1 \text{ mm}$$

Como la longitud calibrada de los extensómetros fue definida en 50 mm, se usará una longitud de pestaña de 50 mm para cada lado de la mordaza. Se realizará un espesor variable que va desde el espesor de la longitud calibrada hasta un espesor de 10 mm solamente para las pestañas. Entonces, según la fórmula de la tabla anterior:

$$\text{Longitud mínima} = 50 \times 2 + 15 \times 2 + 50$$

$$\text{Longitud mínima} = 180 \text{ mm}$$

Por lo tanto, se puede utilizar la recomendación de la **Tabla 5** y la longitud será de 250 mm. Entonces:

$$\text{Longitud calibrada de la probeta} = 50 \text{ mm}$$

$$\text{Longitud disponible para las mordazas (por mordaza)} = 50 \text{ mm}$$

$$\text{Espesor de pestañas} = 10 \text{ mm}$$

$$\text{Longitud total} = 250 \text{ mm}$$

Se pueden ver las dimensiones y tolerancias requeridas especificadas en dibujo en la **Figura 32**.

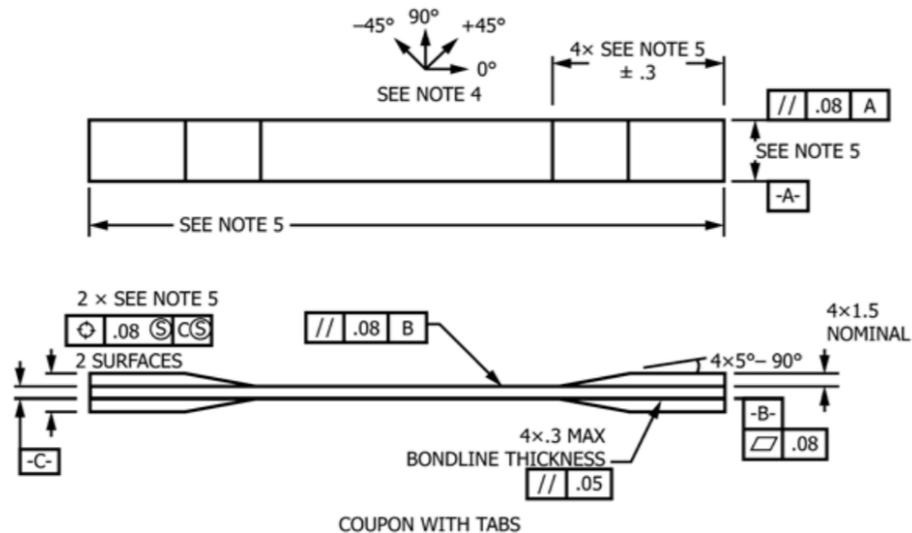
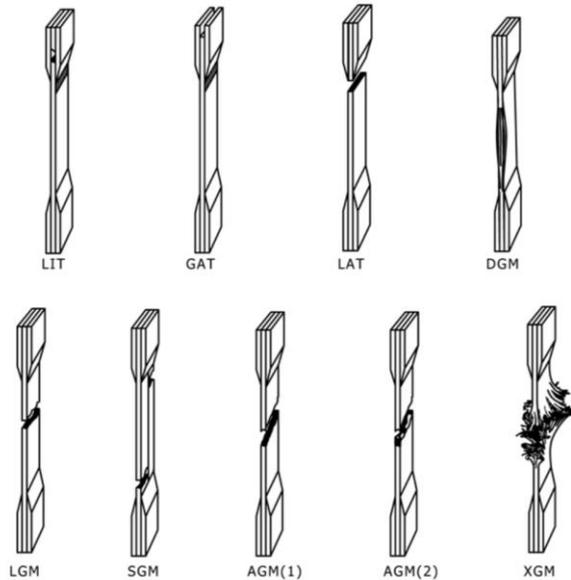


Figura 32. Especificaciones de tolerancias y requerimientos de la probeta (con pestañas) en un dibujo según ASTM D3039

El material a ensayar es una resina epóxica con fibra de vidrio, cuyas probetas se fabricarán con moldes y se terminará el acabado superficial con un esmerilado lubricado con agua. Posterior a esto se debe medir el espesor y ancho de la probeta en ambos extremos y en el centro de la misma; luego de ello se deben promediar estos tres valores de espesor y ancho por separados. Con estos valores promedio se calculará el área de la sección transversal (mm^2). Deben especificarse la gravedad específica y densidad de acuerdo al estándar ASTM D792, y el porcentaje volumétrico de acuerdo al método de quemado de la matriz según el estándar ASTM D2584. Además, el contenido de vacío se medirá según el estándar ASTM D2734. Se marcará el número de probeta del 1 al 5 con un plumón sobre un extremo de cada probeta.

Las condiciones del laboratorio serán controladas a $23 \pm 2^\circ\text{C}$ y 50% de humedad relativa. Las probetas se mantendrán a esa temperatura por 48 horas previas al ensayo, ubicándolas de manera que el aire circule correctamente alrededor de ellas. Para proceder al ensayo, la velocidad de las mordazas se establecerá en 2 mm/min (velocidad fija), según recomendación de la norma ASTM D3039 y se mantendrá la misma temperatura y humedad mencionadas anteriormente. Se ubicarán las probetas en las mordazas, cuidando de la alineación de las probetas (el procedimiento previo de verificación de flexiones no deseadas mencionado anteriormente debe haber solucionado los problemas de alineación). A continuación, se instalará un transductor para medir elongación. Entonces, el ensayo debe proceder aplicando carga a la velocidad seleccionada hasta que se produzca a fractura del material. Se recomienda tomar datos de elongación y fuerza a una frecuencia de 3 Hz.

Durante el ensayo se debe tomar registro de la fuerza y elongación en el punto de transición (en caso de haber alguna transición en la curva esfuerzo-elongación graficada). Adicionalmente, se deben tomar datos de fuerza, elongación y modo de falla en caso alguna de las capas de la probeta presente alguna falla. Finalmente deben tomarse los datos de fuerza máxima, elongación y la manera de detectar la falla (acústica, visual, etc) al momento de presentarse la fractura de la probeta, para la cual se debe determinar a qué modo de falla corresponde, de acuerdo a la **Figura 33**.



First Character		Second Character		Third Character	
Failure Type	Code	Failure Area	Code	Failure Location	Code
Angled	A	Inside grip/tab	I	Bottom	B
edge Delamination	D	At grip/tab	A	Top	T
Grip/tab	G	<1W from grip/tab	W	Left	L
Lateral	L	Gage	G	Right	R
Multi-mode	M(xyz)	Multiple areas	M	Middle	M
long. Splitting	S	Various	V	Various	V
eXplosive	X	Unknown	U	Unknown	U
Other	O				

Figura 33. Modos /códigos de falla de acuerdo a la norma ASTM D3039

Por otro lado, para calcular el esfuerzo último a la tracción se emplearán la fuerza máxima antes de la fractura y el área promedio de la sección transversal, de acuerdo a la siguiente ecuación y con 3 dígitos significativos:

$$F^{tu} = \frac{p^{max}}{A}$$

F^{tu} : Esfuerzo último a la tracción $\left[\frac{MN}{mm^2} \right]$

p^{max} : Fuerza máxima antes de la fractura [MN]

A : área promedio de la sección transversal [A]

Asimismo, para calcular la elongación máxima a la tracción se dividirá el desplazamiento marcado por el extensómetro en el momento previo a la fractura sobre la longitud calibrada de la probeta. Deberá presentarse este valor con tres dígitos significativos. Asimismo, para poder obtener la elongación de transición se tendrán que crear curvas de ajuste lineal en la región inicial (elástica) de la curva esfuerzo-elongación y en la segunda región lineal de la curva esfuerzo-elongación. Luego se prolongarán dichas curvas hasta que se intersecten y se leerá -con tres dígitos significativos- dicha elongación como la elongación de transición. Al finalizar estos cálculos se deberá hacer un reporte en el cual se especificarán los siguientes puntos, según norma ASTM D3039:

- Material (tipo, origen, código, dimensiones, datos del fabricante, diámetro de los filamentos, conteo del número de filamentos, tipo de matriz y contenidos de esta, y pesos del material).
- Nombre del operador del equipo de tracción.
- Método de preparación (fechas de inicio y fin, especificaciones del procedimiento, ciclos de curado y consolidación, y descripción del equipamiento usado)
- Orientación de las capas y secuencia de apilamiento de ellas.

- Densidad, porcentajes volumétricos de refuerzos y vacío, método de muestreo (de las 5 probetas) y espesor de cada capa del material.
- Resultados de ensayos previos (como el que se desarrolla para alinear correctamente la probeta).
- Tipo de probeta usada según norma ASTM D3039 (geometría de la probeta).
- Métodos de acondicionamiento y corte de la probeta, y método de etiquetado de las mismas.
- Métodos y fechas de calibración de los equipos presentes.
- Tipo de equipos, mordazas, etc. usados en el ensayo, y presión aplicada por la mordaza.
- Número y dimensiones de las probetas a usar.
- Condiciones ambientales en el momento del ensayo.
- Velocidad de ensayo.
- Anomalías o fallos durante el ensayo.
- Clasificación de extensómetro usado.
- Tipo y ubicación de los transductores usados.
- Tipo, resistencia, tamaño, factor de galga, método de compensación de temperatura, sensibilidad transversal, resistencia del cable, y factores de corrección de las galgas extensiométricas.
- Curvas esfuerzo-elongación tabuladas para cada probeta.
- Porcentaje de flexión evaluado por cada probeta.
- Carga a la rotura o a la fluencia, con su promedio y desviación estándar.
- Esfuerzo último o a la fluencia, con su promedio y desviación estándar.
- Elongación a la rotura o fluencia (porcentualmente), o elongación a la rotura, con su promedio y desviación estándar.
- Método de evaluar la elongación de transición y su valor, con su promedio y desviación estándar.
- Fecha de ensayo
- Versión de la norma ASTM D3039 empleada

CAPÍTULO 5: IMPLEMENTACIÓN DE LA METODOLOGÍA

5.1. Procedimiento de ensayo usando el equipo GOM ARAMIS 5M:

Para realizar el experimento se debe empezar por armar el equipo GOM Aramis. Para ello se identificarán las siguientes partes del equipo:

- Trípode telescópico
- Soporte para barra de las cámaras
- Barra para colocar cámara y focos
- Cámara izquierda
- Cámara derecha
- Foco izquierdo
- Foco derecho
- Cables de conexión a la computadora
- Monitor
- Teclado y ratón

5.1.1. Montaje del equipo y selección de la probeta

Primero se debe montar el trípode sobre una superficie plana y asegurarse de que la parte superior quede a una altura de unos centímetros más abajo del centro de la región de interés de la probeta a ensayar. Para ello se deben quitar los seguros superiores de las tres patas del trípode para poder alargar las patas del mismo, cuidando que el alargamiento sea al mismo. En caso que la altura conseguida aún no sea la suficiente, se deberán quitar los seguros inferiores de las patas y seguidamente alargar estas equitativamente hasta la altura deseada [28].

Una vez ubicado el trípode de manera adecuada se procede a instalar el soporte para la barra de las cámaras, enroscándolo en posición. Una vez realizado este paso se debe revisar que el soporte este orientado de manera correcta a través de los niveles de burbuja que tiene esta pieza. Luego se procederá a colocar la barra para poner las cámaras y focos, y a asegurarse que el seguro se encuentre activado (comprobando que solo se pueda sacar al usar un pulgar y un índice) para evitar accidentes. La distancia entre cámaras se elegirá después de considerar la probeta a evaluar [28].

A continuación, en la **Figura 34**, se presenta un resumen de los parámetros geométricos existentes y que significan en relación al *setup* del equipo. Por ello es importante conocer la región de interés a medir en la probeta pues esto define el volumen de medición requerido para seleccionar correctamente el lente de la cámara, ancho de su soporte y la distancia de medición requerida.

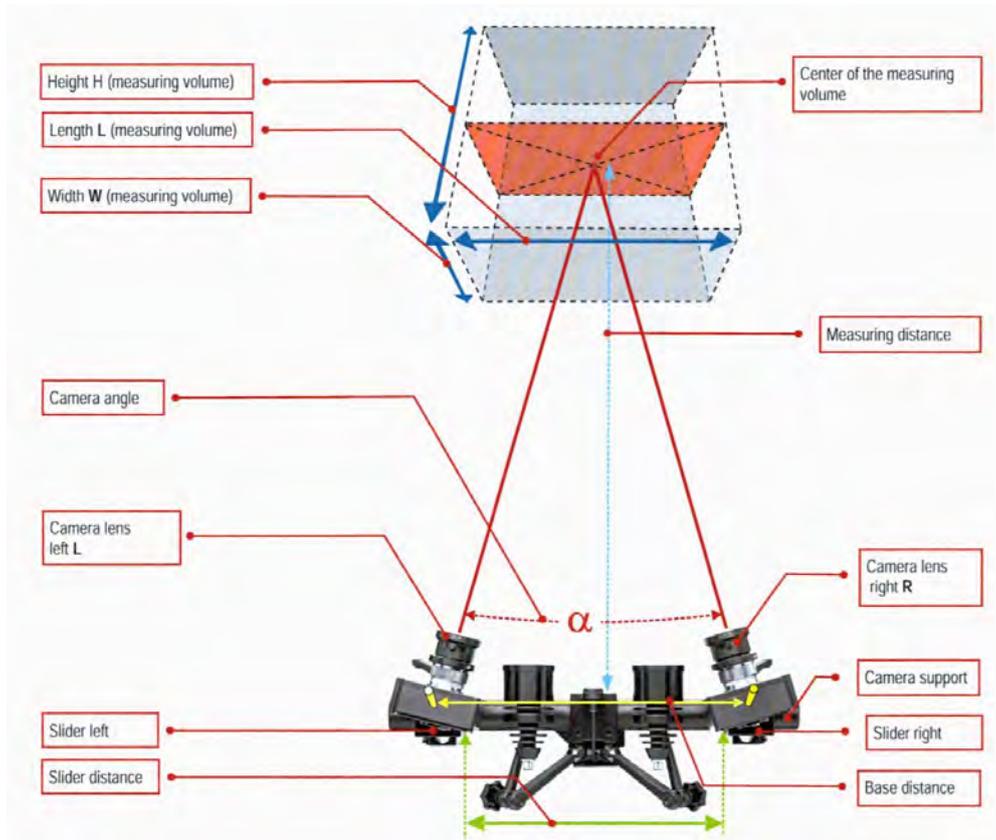


Figura 34. Esquema de medidas usadas en la configuración del equipo. Fuente: Manual GOM ARAMIS

Luego de definir el volumen de medición (correspondiente a la región de interés), se procede a seleccionar el lente de la cámara a utilizar de acuerdo a la siguiente **Tabla 6**, la cual indica qué volúmenes de medición son factibles para el equipo empleado en esta tesis (GOM ARAMIS 5M) para una distancia focal determinada de los lentes de las cámaras [28].

Sensors	Lenses (focal length)	Measuring volume			
		Min. Range	Max. Range	Min. Range	Max. Range
		Length x width [mm x mm]		Length x width [mm x mm]	
Camera support (length)		Adjustable Base			
Camera support		500 mm		800 mm	
		25°	25°	25°	25°
ARAMIS 5M ARAMIS 5M LT	8 mm	200x170	900x750	200x170	1550x1300
	12 mm	130x110	620x520	130x110	1050x880
	17 mm	90x75	440x370	90x75	760x640
	23 mm	65x55	330x280	65x55	570x480
	35 mm	36x30	210x180	36x30	370x310
	50 mm	18x15	140x120	18x15	260x220
	75 mm	10x8	90x75	10x8	170x140
	100 mm	10x8	65x55	10x8	120x100

Tabla 6. Volumen de medición posible correspondiente a cada distancia focal para cada longitud de barra de soporte para las cámaras- Fuente: Manual GOM ARAMIS

Debido a el presente material a ensayar se elige el lente Titanar 35mm de 35 mm de distancia focal debido a que para los ensayos a realizar se tienen regiones de interés de longitudes calibradas de entre 50 y 200 mm, y se requiere una buena profundidad de campo (*depth of field*). Estos lentes son la mejor opción porque otorgan la necesaria profundidad de campo sin tener que aumentar mucho la distancia de medición, causando inconvenientes en el reducido espacio del laboratorio. Además, la **Tabla 7** proporciona la distancia de medición requerida para cada ensayo.

Sensor	Lens	Measuring volume [mmxmm]	Comment	Min. length camera support [mm]	Distance ring [mm]	Measuring distance [mm]	Slider distance [mm]	Camera angle [°]	Calibration Object	Aperture dependent depth of field [mm]												
										1.4	2	2.8	4	5.6	8	11	16	22	32			
ARAMIS 5M	Schneider 35mm	35 x 29	---	500	---	215	MS	25	CQ/CP20 30x 24	---	n.a.	n.a.	n.a.	n.a.	1,5	5	11	---	---			
		50 x 42	---	500	---	275	84	25	CQ/CP20 55x 44	---	n.a.	n.a.	n.a.	1,5	7	14	25	---	---			
		65 x 55	---	500	---	340	110	25	CQ/CP20 55x 44	---	n.a.	n.a.	0,5	6,5	15	27	46	---	---			
		80 x 65	---	500	---	400	138	25	CP20 90x 72	---	n.a.	n.a.	4,3	13	26	43	71	---	---			
		100 x 85	---	500	---	485	176	25	CP20 90x 72	---	n.a.	1,5	12	25	46	72	>100	---	---			
		125 x 100	---	500	---	590	222	25	CP20 90x 72	---	n.a.	8,7	24	45	77	120	>125	---	---			
		150 x 130	---	500	---	700	272	25	CP20 175x 140	---	4	19	42	72	120	>150	---	---				
		175 x 150	---	500	---	805	318	25	CP20 175x 140	---	12	32	62	100	170	>175	>175	---	---			
		200 x 170	---	500	---	910	364	25	CP20 250x 200	---	21	47	87	140	>200	>200	>200	---	---			
		250 x 210	---	800	---	1120	460	25	CP20 250x 200	---	45	86	150	230	>250	>250	>250	---	---			
		300 x 250	---	800	---	1340	556	25	CP20 350x 280	---	80	140	230	>300	>300	>300	>300	---	---			
		350 x 290	---	800	---	1550	650	25	CP20 350x 280	---	120	200	320	>350	>350	>350	>350	---	---			
		400 x 330	---	800	---	1770	688	23	CP20 350x 280	---	180	280	>400	>400	>400	>400	>400	---	---			
		500 x 420	2)	1200 fix ed	---	2150	---	31	CC20 500x 400	---	260	420	>500	>500	>500	>500	>500	---	---			
750 x 630	2)	1200 fix ed	---	3300	---	20	CC20 1000x 800	---	>750	>750	>750	>750	>750	>750	>750	---	---					
1000 x 840	2)	1600 fix ed	---	4320	---	21	CC20 1000x 800	---	>1000	>1000	>1000	>1000	>1000	>1000	>1000	---	---					
Legend		1)	without laser pointer							---	Lens cannot be adjusted to the aperture value.											
		2)	For further information please refer to the user information Hardware for ARAMIS (Fixed Base).							n.a.	It is not possible to focus the complete measuring volume.											
		MS	Slider distance at Mech. Stop							*	Resolution limited by aperture.											

Tabla 7. Tabla de volúmenes de medición con sus correspondientes aperturas recomendadas y distancias de medición requeridas para un lente de 35 mm. Fuente: Manual GOM ARAMIS

Para el caso de la probeta de acero se tiene una longitud calibrada y ancho de 200 mm y 40 mm, respectivamente. Entonces se selecciona el caso de un volumen de medición de 400 mm x 330 mm (se debe considerar que la longitud calibrada va a aumentar durante el ensayo y esta nueva longitud final debe caer dentro del rango de visión de las cámaras). De la tabla resulta una distancia de medición de 1770 mm, con una distancia entre cámaras de 688 mm y un objeto de calibración CP20 350x280. Esta distancia de medición se medirá entre el centro del soporte de las cámaras (el punto láser al centro de dicha barra) y la superficie del objeto a medir. Además, se emplea una apertura f/2.8, que es un balance entre obtener una iluminación adecuada y una buena profundidad de campo [28].

En el caso de la probeta de ABS se tendrá una longitud calibrada y ancho de 57 mm y 19 mm, respectivamente. Se seleccionará un volumen de medición de 100 mm x 85mm, consiguiendo con esto una distancia de medición de 485 mm, una distancia entre cámaras de 176 mm y seleccionando el objeto de calibración CP20 90x72. Se selecciona una apertura de f/5.6, el cual es un balance entre iluminación adecuada y una suficiente profundidad de campo [28].

En el caso de la probeta de fibra de vidrio se tiene una longitud calibrada de 50 mm y un ancho de 15 mm. Por lo tanto, se elegirán los mismos parámetros de montaje y objeto de calibración del caso del ABS [28].

Posteriormente, se ubicarán las cámaras cuidando que la distancia de deslizamiento entre cámaras (240 mm en este caso) sea equidistante del centro (**Figura 35**) y de no sacar los protectores de lente de las cámaras. Debe percatarse además que ambos ángulos de las cámaras sean iguales a 25° (deberían serlo si no se ha modificado el ángulo predefinido) y que los focos sean capaces de iluminar la región de interés de manera adecuada [28].

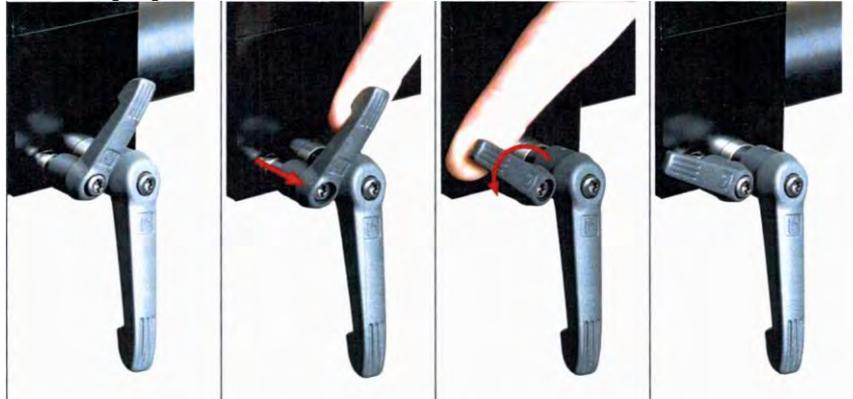


Figura 35. La manija pequeña permite que las cámaras se desplacen axialmente a lo largo de la barra y la manija grande permite que giren alrededor del mismo. Para poder usar la manija pequeña se la debe jalar hacia afuera, de manera que su movimiento no quede restringido por la manija más grande. La manija grande servirá como seguro para poder ajustar si se desea que la cámara apunte hacia arriba o abajo. Fuente: Manual GOM ARAMIS

A continuación, se deben ubicar los lentes en las cámaras; para ello se atornillarán en la longitud de la cámara de acuerdo a la **Figura 36**. Adicionalmente, se puede observar en dicha figura la manera de ajustar la apertura para cada caso; luego de lo cual se deberá bloquear. Debe notarse que para conseguir esta apertura deseada se debe ajustar el control de apertura en el extremo del lente. Por último, se debe ajustar el anillo de bloqueo para evitar perturbaciones a los parámetros ópticos establecidos (**Figura 36**).



Figura 36. Lentes de distancia focal 100 mm. De arriba hacia abajo: 1) Rosca de atornillamiento para enroscarse en el alojamiento, 2) Anillos de distanciamiento que se atornillan en el aro plateado, 3) Anillo de bloqueo que se ajusta con la herramienta de tuerca hexagonal, 4) Ajuste de apertura con anillo de bloqueo manual. Fuente Manual GOM ARAMIS

Se debe asegurar que los cables del equipo estén conectados correctamente y estén ubicados de manera que se eviten tropiezos. La **Figura 37** sirve como guía para la conexión de cables.

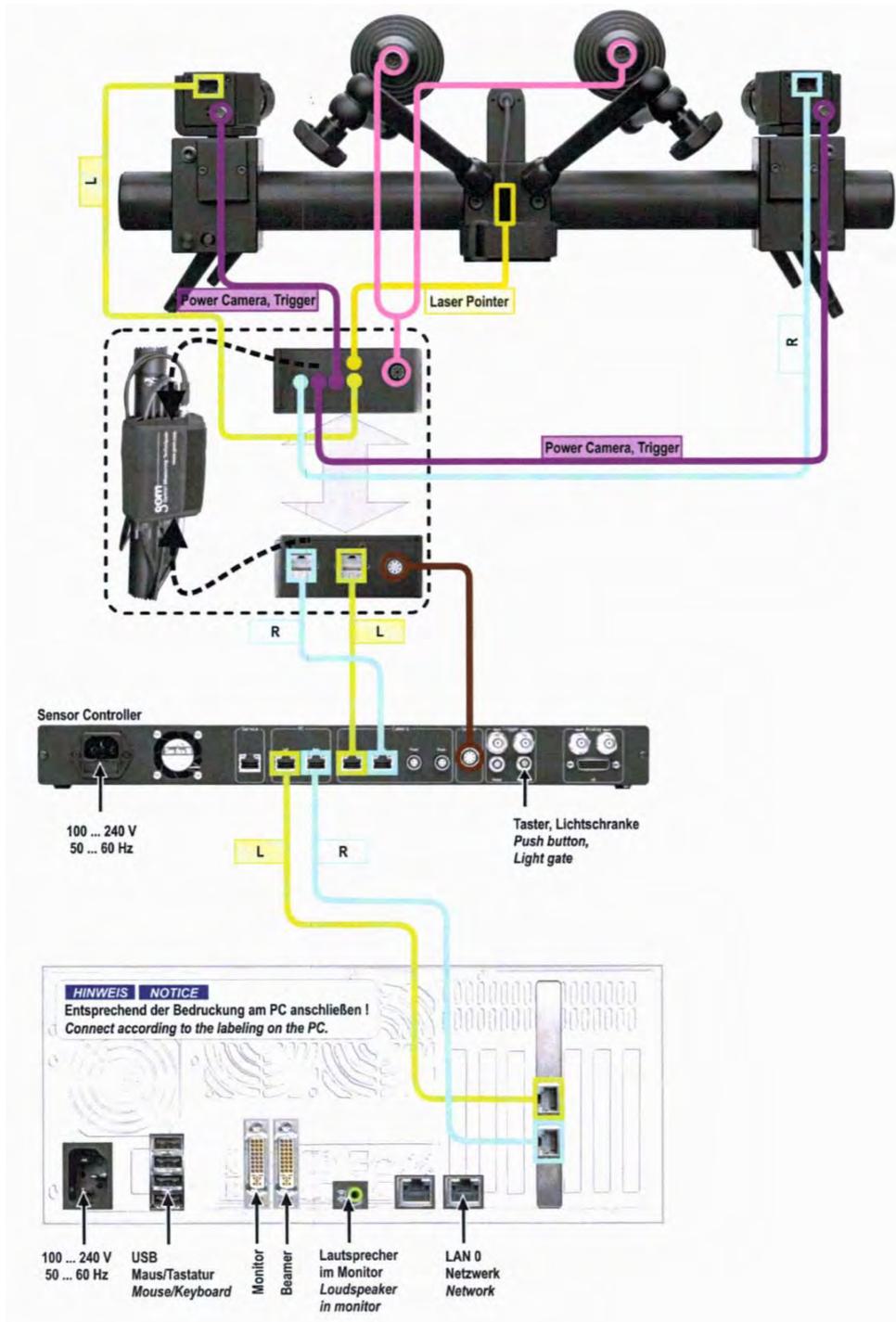


Figura 37. Guía para la instalación de cableado del equipo GOM ARAMIS modelo 5M con dos cámaras y focos, y una computadora de escritorio. Fuente: Manual GOM ARAMIS

5.1.2. Calibración del equipo

Posteriormente se procede a calibrar el equipo usando los objetos de calibración seleccionados anteriormente. Para ello se debe primero asegurar que ambas cámaras miren el mismo objeto [28]. Se abrirá el software ARAMIS PONTOS y se seleccionará la opción *View→Project mode* y se hará clic en la opción *Start/Stop Measurement Mode* para prender la cámara y que se visualice en la pantalla. Se debe prender el puntero

láser desde el software para que se pueda observar que ambas cámaras están viendo la misma imagen, ya que el láser dará una idea sobre si están alineadas o no ambas imágenes (ver la **Figura 38**); las cámaras se deben ajustar usando las manijas de ajuste, como se muestra en la **Figura 35**. Finalmente se ajustará la distancia de medición y la inclinación de las cámaras hasta que el punto láser rojo aparezca en el centro de la cruceta en ambas imágenes. Una vez conseguido esto se asegurarán las manijas para fijar la cámara en su lugar [28].

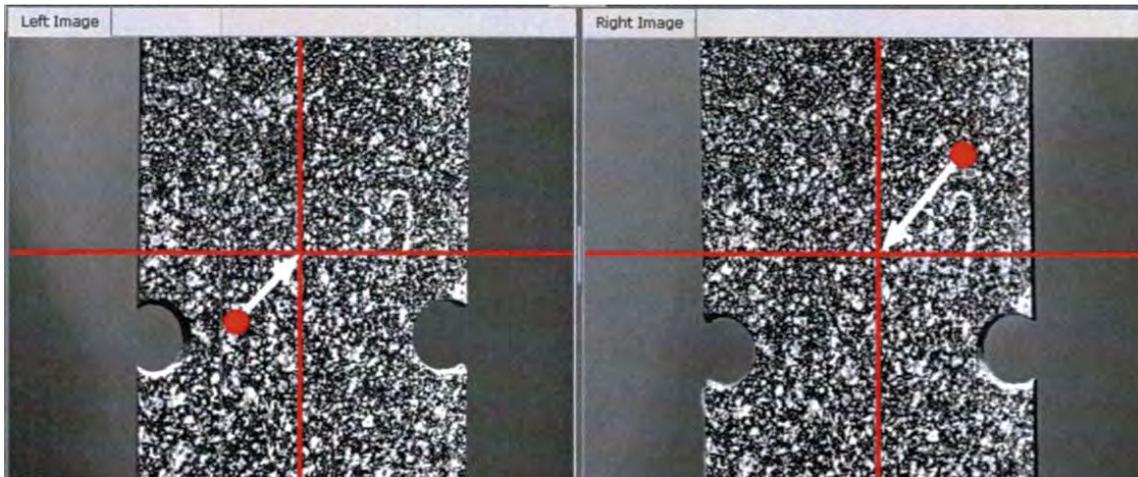


Figura 38. Imágenes mostradas en el software ARAMIS PONTOS. El punto rojo es el puntero del láser. Para poner los dos puntos rojos en una misma línea vertical se debe ajustar la distancia de medición y para ponerlos en una misma línea horizontal se debe ajustar la inclinación de las cámaras. Fuente: Manual GOM ARAMIS

Se prosigue a ajustar el enfoque de la cámara, para lo cual se pondrá una tarjeta en el centro de la probeta y se ajustará el enfoque apuntando hacia esta. Además, como la apertura se mantiene constante en la cámara, se deberá ajustar la luminosidad de la imagen presentada en el software, de tal manera que este pueda procesar correctamente las imágenes en el futuro. Para dicho fin se seleccionará una tasa de fotogramas de 1 fps, en el caso de la probeta de acero y según recomendación del manual. Para el caso de los otros dos materiales se usará una tasa de 2 fps para poder captar mayor información debido a la tendencia a dichos materiales a deformarse menos. Además, se ajustará la velocidad de obturación usando la herramienta en el software haciendo clic en *Image display*→*False color* donde se sabrá que se tiene una velocidad de obturación adecuada cuando no se observe el color rojo sobre las imágenes que aparezcan en la cámara y la distribución de colores estas imágenes sean similares, como se ve en la **Figura 39**. Al acabar esta configuración, se deberá hacer clic en la opción *Start/Stop Measurement Mode*. Adicionalmente se debe ajustar el ángulo del haz de luz de los focos a 10°, como recomendación para lentes de distancia focal mayor a 35 mm (como ocurre en el presente caso) [28].

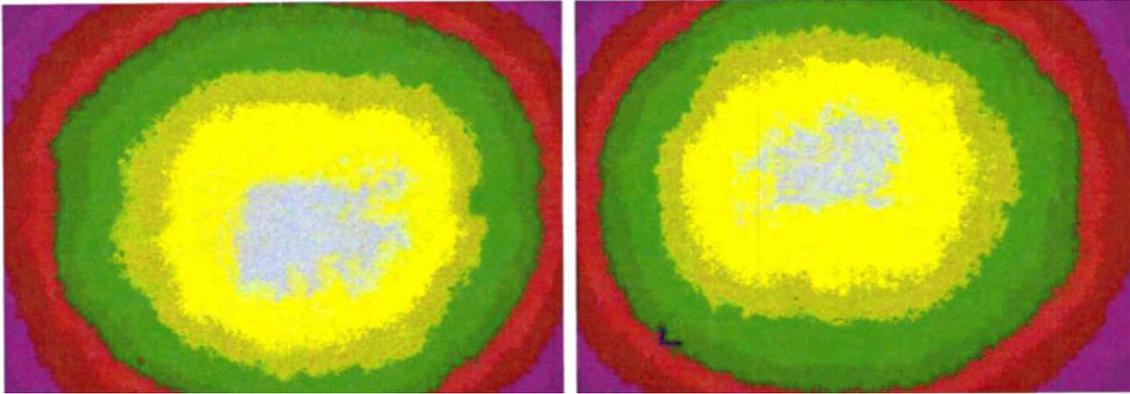


Figura 39. Imagen de las cámaras izquierda y derecha al presionar la opción Image display→False color. Se debe tener una distribución similar de colores para que la configuración de las cámaras sea adecuada. Fuente: Manual GOM ARAMIS

Como preparación de la calibración del equipo los sensores (o cámaras) se deben calentar antes de que se puedan calibrar correctamente. Para el presente equipo se necesitará que las cámaras estén prendidas por 15 minutos antes de proceder a la calibración. En la presente calibración se usarán los objetos de la serie CP, como el de la **Figura 40**.

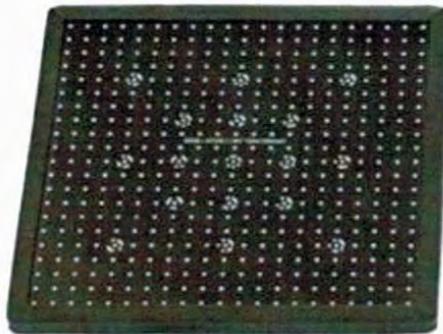


Figura 40. Ejemplo de objeto de calibración a utilizar (versión CP). Fuente : Manual GOM ARAMIS

El procedimiento consiste en que alguien sujete el objeto de calibración de acuerdo a los pasos que el software presenta. Estos incluyen giros o inclinaciones del objeto, como se señala en la **Figura 41**. Para cada paso se debe colocar el objeto de calibración en la posición indicada y luego pulsar aceptar en el software para poder calibrar. Debe cuidarse que el error obtenido en cada paso sea menor a 0.03, en caso contrario se deberá repetir la calibración de dicho paso. Una vez hecho esto para todos los pasos se deberá presionar el botón en el software para procesar los datos obtenidos y poder conocer si la calibración ha sido adecuada o no. El error de calibración total deberá oscilar entre 0.01 y 0.04 píxeles, en caso no ocurra esto se deberá repetir toda la calibración (realizar todos los pasos de calibración de nuevo).

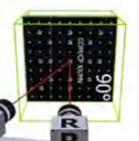
Calibration object panel – coded	
<p>Step 1:</p>  <ul style="list-style-type: none"> Center of the measuring volume Panel position 0° 	<p>Step 2:</p>  <ul style="list-style-type: none"> Closer to the sensor Panel position 0°
<p>Step 3:</p>  <ul style="list-style-type: none"> Further away from the sensor Panel position 0° 	<p>Step 4:</p>  <ul style="list-style-type: none"> Center of the measuring volume Panel position 0° Tilted 40°
<p>Step 5:</p>  <ul style="list-style-type: none"> Center of the measuring volume Panel position 0° Tilted 40° 	<p>Step 6:</p>  <ul style="list-style-type: none"> Left camera normal Panel position 180°
<p>Step 7:</p>  <ul style="list-style-type: none"> Left camera normal Panel position 270° 	<p>Step 8:</p>  <ul style="list-style-type: none"> Left camera normal Panel position 270°
<p>Step 9:</p>  <ul style="list-style-type: none"> Left camera normal Panel position 90° 	<p>Step 10:</p>  <ul style="list-style-type: none"> Right camera normal Panel position 90°
<p>Step 11:</p>  <ul style="list-style-type: none"> Right camera normal Panel position 180° 	<p>Step 12:</p>  <ul style="list-style-type: none"> Right camera normal Panel position 270°
<p>Step 13:</p>  <ul style="list-style-type: none"> Right camera normal Panel position 0° 	

Figura 41. Pasos para la calibración del equipo usando el objeto de calibración CP20 30x24. Fuente Manual GOM ARAMIS

5.1.3. Preparación de la probeta

Una vez calibradas las cámaras se procederá a preparar la probeta para el proceso DIC. Primero se verificará que la probeta este limpia de cualquier grasa o suciedad; para ello, se tendrá que crear el patrón estocástico requerido por el sistema, lo que se conseguirá usando pintura blanca y negra en spray. Para ello primero se pintará la probeta de color blanco, cuidando de que la capa de pintura quede uniforme. Posteriormente, se debe rociar pintura negra por intervalos rápidos y con ligera inclinación sobre la probeta, con el fin de conseguir el efecto de tener puntos de pintura negra sobre la base blanca. Es recomendable que se practique esto previamente sobre un papel, para evitar malograr la probeta. Una vez rociada la probeta se debe comparar con el patrón de la **Figura 42** (se debe ver de esa manera a unos 20cm de cercanía), en caso de ser similar se podrá proceder con el ensayo; si no lo fuera se reaplicará la pintura blanca y luego la negra de la misma manera hasta que resulte correcto [28].

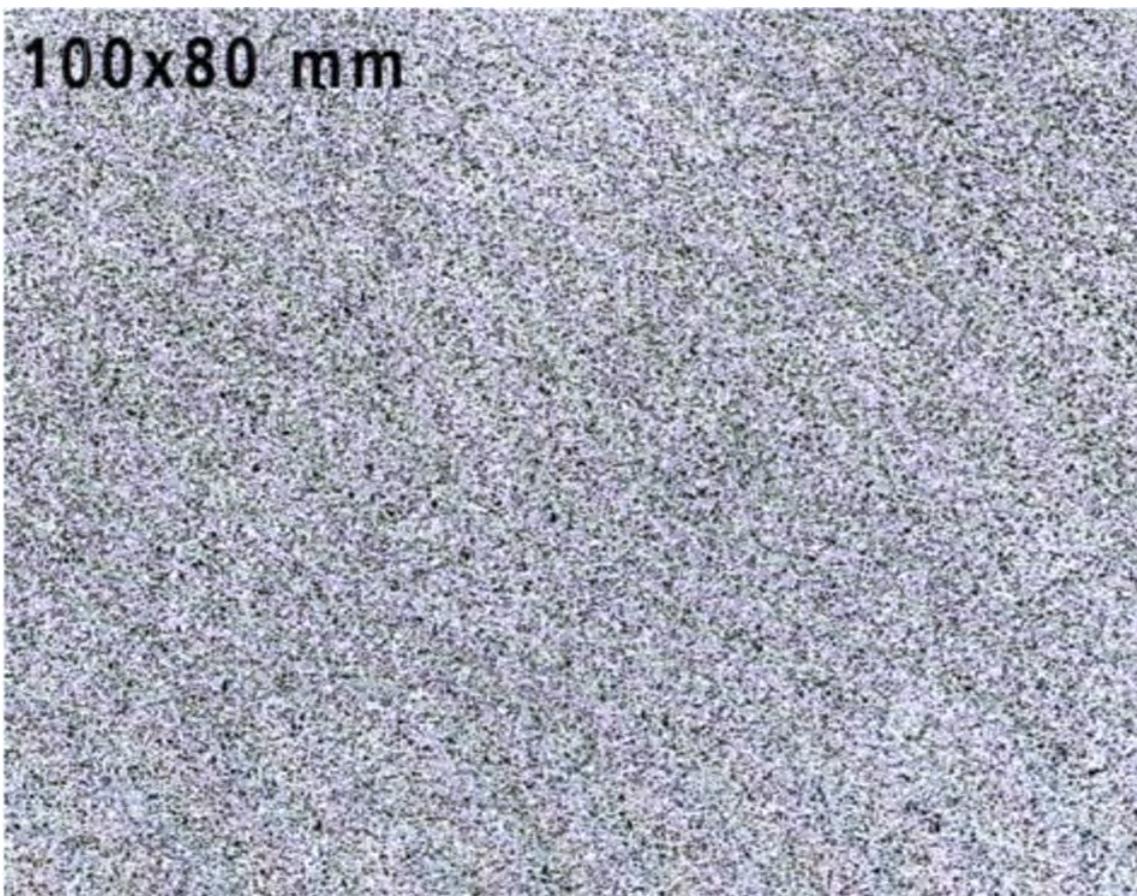


Figura 42. Ejemplo de un buen patrón estocástico. Las medidas de 100x80 mm dan una referencia de cómo debería verse el patrón estocástico de un determinado tamaño. Fuente Manual GOM ARAMIS

A continuación, se procederá a empezar un proyecto 3D en la opción *New Project* del software (en esta etapa se podrá nombrar al proyecto de acuerdo a cómo se crea conveniente); una vez hecho esto todas las imágenes se almacenarán en el nuevo proyecto creado. El software del equipo permite que se especifiquen datos como fechas, número de probeta, etc. en la interfaz para que al momento de realizar un reporte estos datos ingresados aparezcan en automático.

Se procederá a explicar las ligeras variaciones del paso antes mencionado dependiendo del material referido. Entonces, en el caso del acero estructural, la aplicación del patrón estocástico será realizada usando pintura en spray blanca y negra; se aplicará una capa

de pintura blanca, se dejará secar y se procederá a aplicar pintura negra de forma que se cree un patrón de puntos aleatorios [29].

Por otro lado, la manera en que se creará el patrón estocástico en el caso de ABS será empezando con aplicar una capa base blanca de manera uniforme con una pintura en spray. Sobre dicha base se tiene dos opciones para crear el efecto de puntos negros necesarios para el patrón estocástico. Para saber cuál usar primero se deberá practicar sobre un papel. Primero se probará usar pintura negra mate en spray de manera inclinada y en intervalos de tal manera que el aireador cree el efecto de muchos puntos finos y de alta densidad. En caso no se puede realizar con el método anterior por dificultad de uso, se puede realizar el efecto de puntos negros usando escarcha negra y una pintura fijadora mate. Para ello se dejará caer, por gravedad con ayuda de un agitador, alrededor de 3 gramos de escarcha sobre la superficie blanca de pintura aún húmeda (para ello rociar de escarcha inmediatamente después de aplicar la capa de pintura blanca. Sobre la escarcha se aplicará una capa selladora de pintura mate sin color en presentación en spray. Luego se comparará con los patrones recomendados por el software [6].

Asimismo, se presenta el caso del material de fibra de vidrio en resina. Para este caso no solamente se considerará el patrón estocástico sino también el uso de pestañas de apoyo en la sujeción de la probeta, para lo cual se presentan referencias de estudios pasados y la elección óptima del diseño de pestañas.

Las pestañas son necesarias en una probeta que use una resina como material base debido a que de esta manera la falla se concentrará dentro de la región de interés. Tabrizi et al. [32] sugiere usar pestañas con adhesivo de poliuretano de bajo módulo y un ángulo de 10° ; sin embargo, debido a que la probeta ya es pequeña, si las pestañas siguieran estas recomendaciones serían aún más pequeñas y el equipo de tracción utilizado no sería capaz de sujetarlas. Debido a ello, se prefieren pestañas como las realizadas en el trabajo de Shokrieh et al. [33]; en este caso se unen dos rectángulos de mayor grosor que la probeta a cada lado de la misma, de manera que sean más resistentes a la sujeción de la mordaza del equipo de tracción y sean capaz de transferir la fuerza hacia la probeta sin concentraciones de esfuerzo (ver **Figura 43**). Estas dos pestañas de material de fibra de vidrio en resina epóxica tejida se unirán mediante con adhesivo de poliuretano de bajo módulo a ambos lados de la probeta a través de toda la sección.



Figura 43. Probeta en el medio con dos pestañas de mayor espesor unidas a ella [33].

Por otro lado, para la realización del patrón estocástico en la fibra de vidrio con resina se seguirá el uso de un spray de pintura blanca sobre pintura negra, mas debe estar escalado al tamaño de la región de interés.

5.1.4. Establecimiento de parámetros de ensayo

Ahora se procederá a establecer los parámetros de ensayo. Usaremos la opción *Project* → *Project parameters* para cambiar los parámetros generales preestablecidos en el proyecto que estemos realizando. Los parámetros generales que se pueden cambiar son los siguientes:

- Tamaño de faceta: El valor preestablecido por el software es de 19x19 píxeles. Además, debe notarse que se usarán facetas de forma cuadrada.
- Paso de faceta: El valor preestablecido por el software es de 15x15 píxeles.
- Método de cálculo de deformaciones: Se elige entre el método lineal y el método spline. Para fines de este trabajo se usará la deformación lineal debido a que todos los ensayos son a tracción simple.
- Base de cálculo: El valor preestablecido es de tamaño 3.
- Cuota de validez: La cuota de validez predeterminada es 55%.
- Información de la etapa (fotograma) del ensayo: La información que se puede especificar puede ser tiempo o fuerza empleadas en el ensayo, por ejemplo. Esta información puede servir para visualizarse durante el ensayo o para ser incluida en algún reporte posterior.
- Punto de inicio automático: Se define si se realizará la selección de la faceta (o punto de la imagen) de manera automática o de manera manual en un paso posterior.

Asimismo, se definirán los parámetros de cada etapa (fotograma). Estos sirven para el procesamiento de datos del proyecto y existen las opciones de *Standard*, *Fast* y *High accuracy*. Para los presentes ensayos se usará la configuración *Standard* debido que es suficiente para crear un balance entre tiempo de procesamiento y precisión de datos obtenidos. Ahora se procederá a entrar a la fase de medición; para ello se elegirá la opción *Start/Stop Measurement Mode* de la barra de herramientas del software.

Se debe ajustar los parámetros de cada cámara, los cuales son los siguientes:

- Tiempo de exposición: Debe ser el mismo que consiguió una buena exposición de imagen de acuerdo al análisis de las imágenes (ver **Figura 39**), lo que variará para cada probeta.
- Apertura del diafragma: Debe variar de acuerdo al ensayo a realizar. En el presente trabajo esto es f/2.8 para las probetas de acero y f/5.6 para el caso del ABS y la resina con fibra de vidrio.

A continuación, se debe proceder a la etapa de registro de datos. Para ello se usará el método *Simple with AD*, con una velocidad de registro de imágenes de 1 o 2 fps, que debe coincidir con la tasa de fotogramas de las cámaras, dependiendo del material a ensayar. En este método seleccionado cada imagen capturada por las cámaras se agrega al proyecto creado de manera automática y forma una etapa (*stage*), y se debe seleccionar manualmente el momento en que se empiece a registrar las imágenes.

Se procede a mencionar las variaciones en la selección de los parámetros empleados en el caso del acero estructural, para lo cual se diferenciarán estudios realizados en este material y luego se seleccionarán los parámetros adecuados.

Switzner et al. usó probetas de acero 1018 soldadas con 304L de 2 mm de espesor, 3 mm de ancho y 25 mm de longitud calibrada [7]. Además utilizó una velocidad de ensayo de 0,4 mm/s (24 mm/min) y las imágenes se registraron cada 1 segundo en el software. Finalmente, el software usó facetas de 15 píxeles de tamaño y paso de faceta de 8 píxeles (2 píxeles de traslape). Por otro lado, Fonseca et al. usó los siguientes parámetros para un ensayo en acero ferrítico, empleando solamente el patrón de granos propio del material como patrón estocástico [1], los granos del acero tenían un tamaño promedio de 100 μm y la probeta tenía una sección de 2 mm x 2 mm (ancho y espesor), las cámaras usadas eran de 12 bits y de 1300x1026 píxeles de resolución, las imágenes se tomaban cada 0,01 s, y el tamaño de faceta de 32 x 32 píxeles. Asimismo, Kamaya, M., & Kawakubo, M. [34] ensayaron probetas hechas de planchas de acero al carbono SM490A (estándar JIS) de 0,16% de carbono a una velocidad de 0,2 mm/min; sin embargo se debe considerar que este valor bajo de velocidad posiblemente se eligió por precaución al tratarse de planchas delgadas, muy distintas a las proporciones planteadas por la norma de ensayos a tracción ASTM D8. Adicionalmente, Savic et al. [29] se basó en una resolución espacial de 14 micras por píxel para una probeta de 20 mm de longitud calibrada, 5 mm de ancho y 1,3 mm de espesor, además empleó unos lentes de 100 mm con una apertura f/2.8 y una tasa de fotogramas de entre 4 y 6 fotogramas por segundo (fue variable pues usó tasas más altas para los momentos de mayor tasa de deformación).

Usando como referencia los estudios mencionados en el párrafo anterior [7], [1], [34], [29] y comparando las velocidades de ensayo a las propuestas en la norma ASTM D8, se seleccionará una velocidad de ensayo 5,25 mm/min. Adicionalmente, la tasa de toma de datos de fuerza y desplazamiento se establecerá en 10 Hz, que serán suministrados por una celda de carga y un transductor de desplazamiento.

Como se comentó en el capítulo anterior, las deformaciones hacia el final del ensayo en acero no son uniformes debido a la formación de un cuello. Por ello es que se prefieren tamaños de faceta y de paso de faceta elevados. Entonces y en referencia a los estudios mencionados anteriormente, el tamaño de faceta a usar será de 32x32 píxeles con un paso de 25 píxeles, para conservar un 20% de traslape, como se mencionó anteriormente [29]. El resto de parámetros se mantienen según el estándar del equipo. De la misma manera, se seguirá el mismo procedimiento para elegir los parámetros en el caso del ABS que en el caso del acero.

En el trabajo de Schnittker [6] las probetas de ABS se acondicionaron a 50°C por 48 horas y luego se colocaron en un desecador por 15 horas adicionales. Además, se dispusieron de mordazas tipo cuña para sujetar la probeta para evitar dañar la superficie de la probeta. La velocidad de ensayo fue de 0,025 mm/s (forzada para obtener resultados comparativos con un estudio anterior) a una temperatura de 23°C [6]. Por otro lado, en el trabajo de Cantrell [35] las probetas de tipo IV (según ASTM D638) se ensayaron a una velocidad de 1.5 mm/min a 23°C y se manejó cámaras de escala de grises de 5 megapíxeles de resolución. El tamaño de faceta usado fue de 29 píxeles y el paso de la misma fue de 5 píxeles. En dicho caso se eligió la técnica DIC para evitar errores de medición por el deslizamiento de las mordazas y evitar errores por poca conformidad de las celdas de carga o el mecanismo de carga. El software tomó los datos de carga (fuerza aplicada a la probeta) a una frecuencia de 10 Hz y las cámaras tomarán

imágenes a una frecuencia de 1 Hz, usando como referencia el trabajo de Cantrell et al. [35]. Además, Fang et al. [40] realizó un ensayo a tracción satisfactoriamente en una probeta de sección calibrada de 70mm x 10mm x 4mm (longitud, ancho y espesor, respectivamente) con una escala espacial de 46 píxeles/mm longitudinalmente y transversalmente. Para ello se utilizó una cámara con una resolución de 3264 x 2448 píxeles; además, debido a que la probeta tiene una forma alargada y a que se desea que la imagen proyectada en las cámaras sea lo más cuadrada posible (para que se aproveche mejor el campo de visión de las cámaras), se seleccionará una región de interés relativamente cuadrada, lo que crea el problema de que puede que la probeta empiece a romper en partes de la longitud calibrada que no están incluidas en las imágenes de las cámaras; por ello, se recurre a una solución que presenta el estudio de Fang et al. (2006) [40]. En este estudio [40] se procede a reducir el espesor de la probeta en 0,1 mm en el centro de las imágenes que muestra la cámara para que empiece a romper en ese punto.

El estudio de Fang et al. [36] demuestra que para velocidad de ensayo menores a 25 mm/min no hay variación notable en la curva esfuerzo deformación para una geometría dada. Debido a ello, la decisión de uso de una determinada velocidad de deformación debe ser influenciada por otros factores como puede ser una mejor representación en las imágenes que ayude al buen desempeño de las cámaras de la técnica DIC. En consecuencia, se elige una velocidad de ensayo de 1,5 mm/min, apoyado en la norma ASTM D638. Se usará un tamaño de faceta de 29 píxeles, con un paso de faceta e 23 píxeles para mantener la regla de un 20 % de traslape. El resto de parámetros se mantiene según el estándar del equipo.

Finalmente, se presentará la justificación y selección de parámetros para el caso de la probeta de fibra de vidrio en resina.

En un estudio realizado por Willems et al. [37] se dispuso de un tamaño de faceta de 3x3 en un ensayo de tensión material tejido de fibra de vidrio. Además, se utilizó una escala de imagen de entre 3.5 y 7 px/mm, una longitud calibrada de entre 6 y 28 mm, tamaño de faceta (en mm) de entre 2.5 y 10 mm y un paso de faceta de entre 2 a 8 mm. La cámara perteneció a un sistema ARAMIS y tuvo una resolución de 768x572 píxeles y usó 12 bits para realizar una imagen en escala de grises. Además, se utilizó un equipo de tracción con capacidad de aplicación de fuerza de 10kN y precisión de 0.1%, con velocidades de ensayo de entre 6 y 60 mm/min (**Figura 44**).

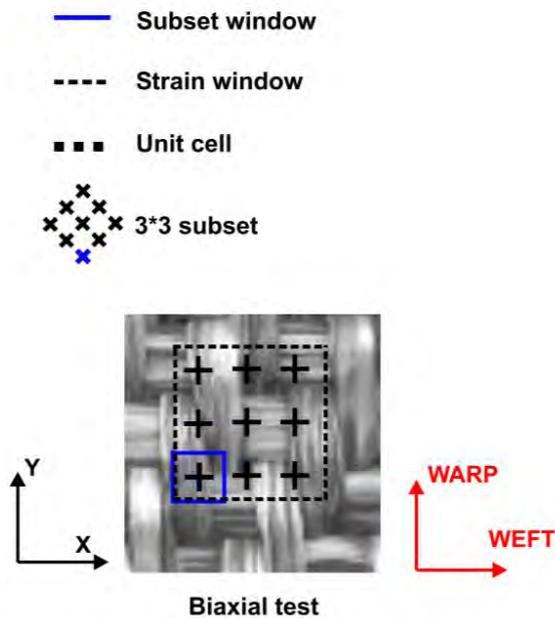


Figura 44. Representación del tamaño de faceta que se usó en el experimento con fibra de vidrio tejida. Willems, A., Lomov, S. V., Verpoest, I., & Vandepitte, D. (2009). Fuente: *Drape-ability characterization of textile composite reinforcements using digital image correlation. Optics and Lasers in Engineering*, 47(3-4), 343-351.

En el caso de la fibra de vidrio, existen muchas resinas con las que se puede realizar el material compuesto, por lo que es conveniente tener una referencia de las propiedades y deformaciones esperadas. Asp et al. [38] realizó un estudio comparando propiedades para diferentes composiciones de la resina epóxica. En la **Tabla 8** se pueden observar que la deformación unitaria a la fractura oscila entre 1.8 y 7%.

Material	DGEBA/DETA	DGEBA/MHPA	DGEBA/APTA	TGDDM/DDS
E (GPa)				
This study	2.07 ± 0.15	2.92 ± 0.12	2.93 ± 0.13	3.77 ± 0.07
Literature	—	3.08	3.24	4.28
σ_u (MPa)				
This study	69.0 ± 5.4	85.9 ± 3.8	73.1 ± 1.2^a	59.9 ± 12.7
Literature	82	84	73	42–65
ϵ_u (%)				
This study	7.00 ± 1.50	6.50 ± 1.00	6.14 ± 0.53	1.77 ± 0.44
Literature	14	3.1	4.8	1.34
G_{IC} (J/m ²) (literature)	130 ± 20	110	300	69–95
T_g (°C) (literature)	107	150	93	140

Tabla 8. Propiedades mecánicas para distintas resinas en el caso del material compuesto de fibra de vidrio. [38]

Otro estudio, Quanjin et al. [8], utilizó un equipo de tracción de 50kN de capacidad para ensayar una probeta de fibra de vidrio laminada en resina (de seis capas) en relación de 2:1 (resina y fibra de vidrio, respectivamente). La velocidad de ensayo fue de 1 mm/min, de acuerdo al estándar ASTM D638, se usaron mordazas tipo cuña y una cámara Nikon D3100. La resolución empleada fue de 4608x3072 píxeles y la región de interés fue la región central con una longitud calibrada establecida (**Figura 45**).

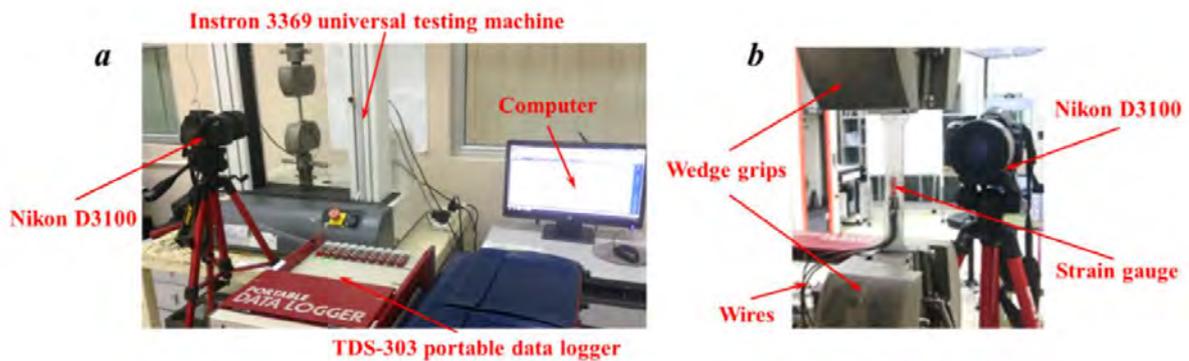


Figura 45. Set-up del experimento DIC de fibra de vidrio con resina epoxy.^[8].

De acuerdo a lo comentado anteriormente, se seleccionará una velocidad de ensayo de 1 mm/min y un tamaño de faceta de 40 píxeles (se obtuvo promediando los tamaños de faceta mínimos y máximos usados en el primer estudio presentado para este material). Asimismo, se selecciona un paso de faceta de 32 píxeles, para continuar con el promedio recomendado de un traslape de 20%. El resto de parámetros se mantienen según el estándar del equipo.

5.1.5. Procesamiento de imágenes

Se procederá a la etapa de cómputo o procesamiento de imágenes. Para ello se usarán los parámetros de tamaño y paso de faceta previamente definidos. Además, se usará una máscara (*mask* en el software) en esta etapa, con la cual seleccionaremos solamente el área de sección reducida en las probetas que usemos, para así poder comparar las medidas de deformación con las que mide el extensómetro del equipo de tracción [12].

A continuación, se procede a empezar un punto de inicio de medición. Este punto se debe definir (ya sea de manera manual o automática) para cada etapa (*stage*) y suele estar en la misma faceta para cada etapa en el procesamiento de imágenes. Las etapas a analizar serán aquellas desde que empieza el ensayo hasta que se fractura; debido a ello solamente es necesario definir manualmente el punto de inicio de medición en la primera etapa analizada, ya que las restantes se definirán automáticamente. Se usará la opción *Add start point* → *Simple* y se definirá el primer punto de inicio de medición en el centro vertical, más ligeramente hacia uno de los dos extremos de la región de sección reducida de la probeta (cuidando que no sea en algún punto cercano a un concentrador de esfuerzos, con la finalidad de que en ninguna etapa ocurra una deformación excesiva en el punto de inicio de medición y así que se pueda iniciar de manera automática cada punto de medición. Debe cuidarse que la faceta del punto de inicio seleccionado contenga un patrón estocástico adecuado, para lo cual puede seleccionarse la faceta elegida en las imágenes de la cámara usando el comando Ctrl+click izquierdo (**Figura 46**).

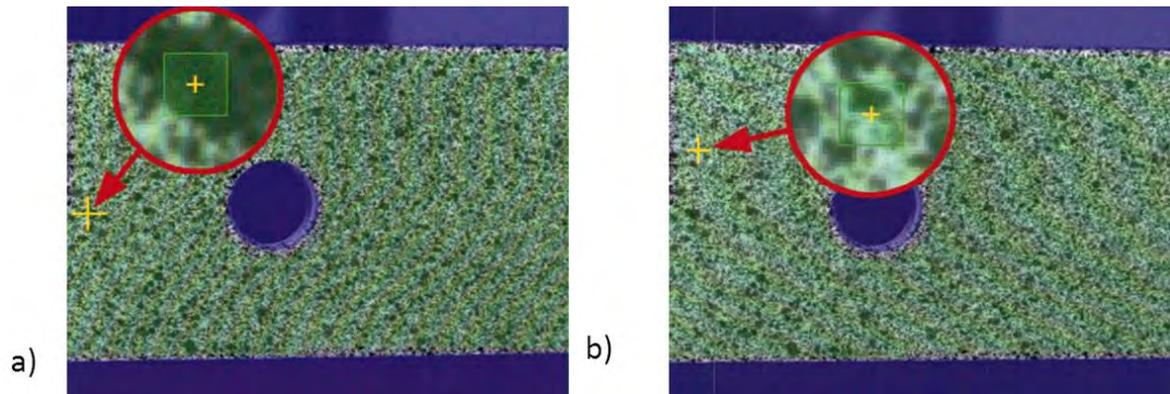


Figura 46. a) Faceta con punto de inicio incorrecta debido a un patrón estocástico deficiente, b) Faceta con punto de inicio correcta que pueda seleccionarse automáticamente en las siguientes etapas (stages). Fuente Manual GOM ARAMIS

Para proceder al cálculo de deformaciones se empleará el método de cálculo con el método lineal, de acuerdo a como ya se había adelantado anteriormente. Los parámetros para este cálculo son los siguientes:

- Base de cálculo: La base de cálculo usada será de 3x3 para poder captar efectos locales, como se mencionó en un capítulo anterior.
- Cuota de validez: Se definirá una cuota de validez de 55%, es decir que de los 9 puntos usados para el cálculo (base de 3x3) solamente se necesita que existan el 55% de ellos para proceder a calcular deformaciones.

Adicionalmente, se debe asegurar que la etapa de referencia siempre sea la etapa inicial, es decir la etapa 0. Para asegurar esto se debe entrar a la dirección *Project parameter* → *Strain* → *Strain method* → *Total* y verificarse que la etapa de referencia sea la indicada [12].

A continuación, se debe realizar una transformación de coordenadas, para así asegurar que las deformaciones se miden en los ejes que requiere un ensayo a tracción (es decir, a lo largo de los ejes longitudinales y horizontales de las probetas) (Figura 47).

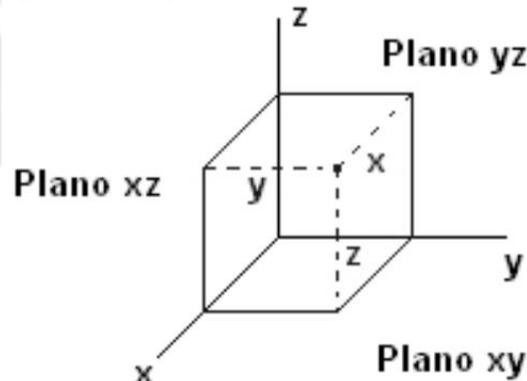


Figura 47. Sistema de coordenadas deseado. En la probeta a tracción el plano xy (o plano Z) corresponde a la superficie de la probeta mientras que el eje Y, al sentido longitudinal a la tracción, y el eje x, al sentido transversal en la probeta. Fuente: <https://www.uv.mx/personal/aherrera/files/2014/05/03-Sistemas-de-Coordenadas-en-3D-AHE.pdf>

El método de transformación a usar será el de transformación 3-2-1, para lo cual se deben crear determinados puntos de píxeles tridimensionales que se puedan observar en las cámaras bidimensionales. Para crearlos primero se debe crear un plano de referencia, para lo cual se deben definir de forma manual todas las facetas creadas como pertenecientes a un solo plano de referencia [12]. Para realizar esto se usará el

método *Point-Point-Point Plane* perteneciente a la opción de crear *primitives*. Una vez hecho esto se crearán tres puntos de píxeles sobre dicho plano definido en uno de los bordes de la probeta, como se observa en la **Figura 48** y **Figura 49**.

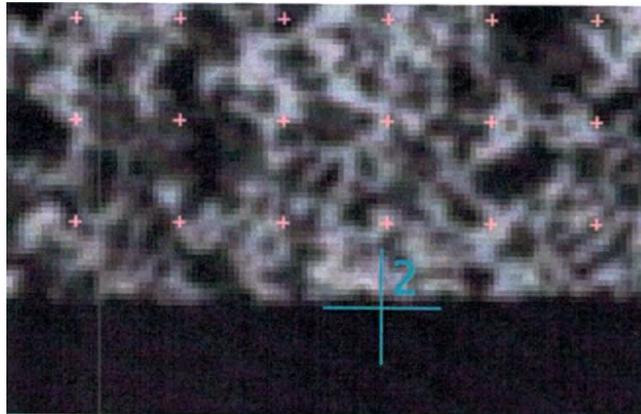


Figura 48. Punto de píxel (cruzeta verde) sobre el borde longitudinal de una probeta (eje y). La probeta se diferencia por tener un patrón estocástico. Fuente: Manual GOM ARAMIS

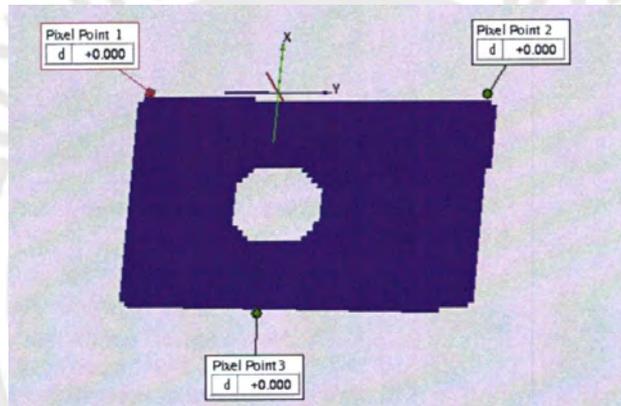


Figura 49. Ubicación de los tres puntos de píxeles que se desean crear en los bordes de la probeta. El eje Y es longitudinal y pasa por los puntos 1 y 2. Fuente Manual GOM ARAMIS

Se procederá a seleccionar la opción *3-2-1 transformation*. En este método, y según lo realizado hasta el momento, se definirá al eje Y como aquel que pasa a través del sentido longitudinal del espécimen. Entonces se procederá a ejecutar la transformación tipo ZZZ-XX-Y. Para comenzar, se seleccionarán los puntos (o píxeles) 1, 2 y 3 para crear el plano Z; luego, los puntos 1 y 2 para crear el plano X (perpendicular al plano Z creado); y, finalmente, el punto 3 para crear el plano Y (perpendicular a los planos Z y Y creados). De esta manera el eje Y (perpendicular al plano Y) pasa por el borde de la probeta [12].

Una vez se tiene los ejes definidos correctamente, se procede a crear y editar la manera en que se presentan los resultados. Para el ensayo a tracción requerimos conocer deformaciones y elongaciones en el eje Y (*displacement Y* y *diff: épsilon Y*, respectivamente). Además de ello se ve conveniente procesar los siguientes resultados:

- Esfuerzo von Mises
- Esfuerzo de fluencia
- Elongación máxima

Con fines de tener información extra en cada etapa, se definirá un punto de información (*info point*) en el centro exacto de la probeta usando el comando *Ctrl+clic* en las

imágenes 2D presentadas en el software. Esto permitirá conocer la elongación en el punto seleccionado (aunque en realidad se selecciona una faceta y no un punto) de manera instantánea. Si se desea ver dicho resultado para cada etapa se creará un punto de etapa (*stage point*) a partir de un punto de información (**Figura 50**).

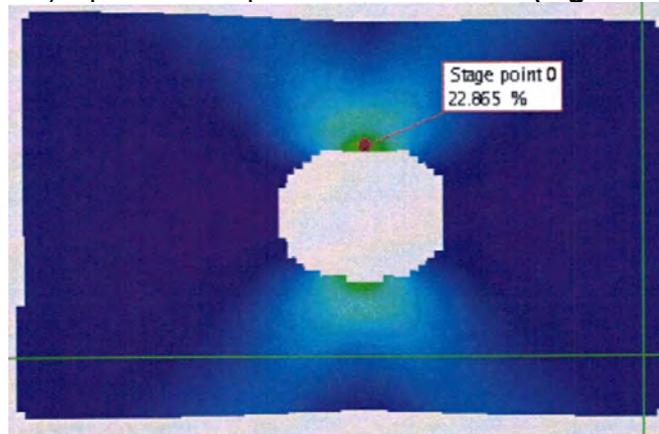


Figura 50. Punto de etapa (*stage point*) donde se observa la elongación máxima en la faceta seleccionada por dicho punto. Fuente: Manual GOM ARAMIS

Para poder tener una representación clara de las imágenes que aparecen en el procesamiento de imágenes se debe configurar la leyenda con la que se representarán las imágenes. Para ello, se hará clic en la leyenda que aparece en las imágenes ya procesadas y se seleccionará la opción *Edit properties* y se seleccionará la opción de escalamiento automático sin restricciones. Con este fin se elegirá la opción *Properties*→*Scaling*→*Min/Max.*→*Automatic* [12].

5.1.6. Cálculo de deformaciones

Para analizar las imágenes ya procesadas se crearán dos pares de puntos representativos a lo largo de la probeta, como se muestra en la **Figura 51**. Se puede observar los pares de puntos A y B, de los cuales los puntos del par A se ubicará en el centro vertical y en los dos extremos de la probeta a unos 10 mm del extremo sujeto por las mordazas en cada uno de los extremos; esto permitirá conocer la deformación entre la longitud total de la probeta, pero ignorando algún efecto del resbalamiento entre las mordazas y la probeta. Asimismo, los puntos del par B se ubicarán lo más cercano posible a los extremos de la longitud calibrada de cada probeta, de tal manera que simule lo medido por el extensómetro del equipo de tracción. Este par permite captar efectos locales y, en caso de ocurrir fisuras, permite validar las mediciones del extensómetro que pueda tener dichas mediciones afectadas por el hecho de estar unido a la probeta físicamente. Para crear dichos puntos en el software se usará la opción de crear puntos primitivos, para lo cual se usará el comando *Ctrl+clic izquierdo* por cada punto, 4 en total [39].

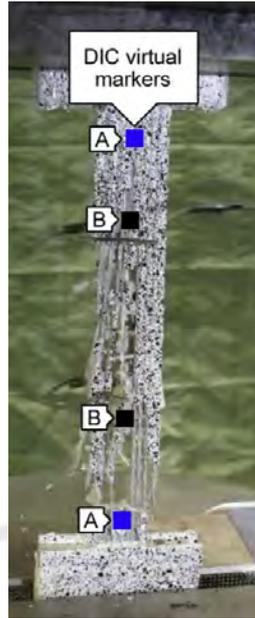


Figura 51. Ejemplo de ubicación de los dos pares de puntos necesarios para poder realizar el ensayo de tracción. [39]

Para conseguir medir las elongaciones y deformaciones necesarias usando dichos puntos se usará la función *Point-Point Distance*. Esta función se realizará entre los dos puntos A y los dos puntos B por separado, seleccionando los puntos primitivos correspondientes, donde la información de la distancia entre puntos se leerá en una flecha dentro de las imágenes. De esta manera se comparará la distancia entre puntos en la etapa 0 y la última etapa antes de la fractura (las distintas etapas se seleccionan en la parte izquierda de la interfaz). Mediante dicha comparación se obtienen los datos necesarios para calcular deformación y elongación:

- Distancia entre puntos inicial (D_i)
- Distancia entre puntos final (D_f)

Así, para calcular la deformación de la probeta se utiliza la siguiente fórmula:

$$\text{Deformación final} = D_f - D_i$$

Y para calcular la elongación de la probeta:

$$\text{Elongación} = \frac{D_f - D_i}{D_i}$$

Como se tienen dos pares de puntos se pueden realizar dos grupos de resultados distintos; es decir, se puede tener una elongación y deformación final de la probeta usando los puntos A o B. Entonces se tiene:

$$\begin{aligned} \text{Deformación final}_{(A)} &= D_{f(A)} - D_{i(A)} \\ \text{Elongación}_{(A)} &= \frac{D_{f(A)} - D_{i(A)}}{D_{i(A)}} \end{aligned}$$

Y también,

$$\text{Deformación final}_{(B)} = D_{f(B)} - D_{i(B)}$$
$$\text{Elongación}_{(B)} = \frac{D_{f(B)} - D_{i(B)}}{D_{i(B)}}$$

Para comparar los resultados que usan datos del extensómetro del equipo de tracción (que son los que se usan según cada norma ASTM) de manera justa se usarán la deformación final y elongación del punto B. Mas, si se desea comparar los resultados obtenidos con datos del transformador diferencial de variación lineal (LVDT) del equipo de tracción, se usarán los resultados usando datos del punto A [12].

Adicionalmente, se procederá a verificar la deformación máxima y promedio por medio de parámetros estadísticos. Para ello se seleccionará primero el área a evaluar en la opción *3D view*. Posteriormente se seleccionará la opción estadística de *Maximun* y *Average* para generar dichos resultados. Si se desea se puede exportar esta data a otro programa o incluso comparar varias áreas definiendo data sets y seleccionando dos áreas diversas a comparar usando las opciones *Maximun* y *Average* [12].

La información anterior se puede presentar en formato de reporte. Para ello se usará la plantilla de *Statistics*. En dicha plantilla se puede agregar el elemento de *Point-Point distance* activando la opción *Add to report*. Entonces se usará el eje X para representar el número de etapa o *Strain stage* y en el eje Y se presentará el valor medido de distancia entre los puntos A y B. (**Figura 52**). Para realizar esto se hará doble clic en el diagrama vacío y en el eje X se procederá a seleccionar *Visualization*→*Project*→*Strain Stage* y para el eje Y se seleccionará la opción *Point-Point distance*. La escala de los diagramas creados estará de acuerdo con la anterior leyenda presentada en las imágenes 3D en general [12].

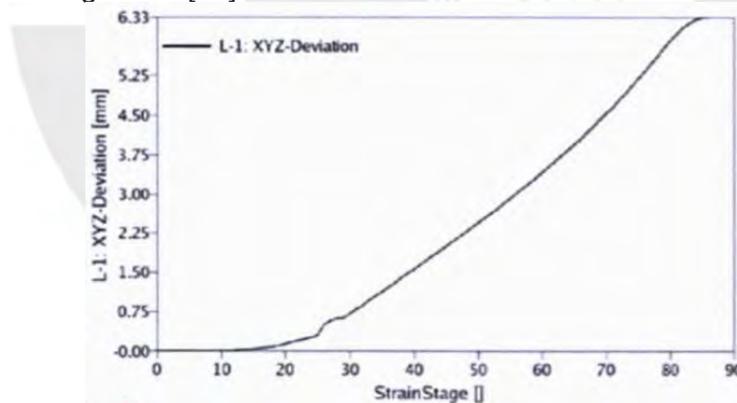


Figura 52. Ejemplo de plantilla Statistics posible de crear usando el eje X como Strain Stage y el eje Y como la distancia entre puntos A y B (se deben realizar los figuras, una para cada par de puntos). Fuente : Manual GOM ARAMIS

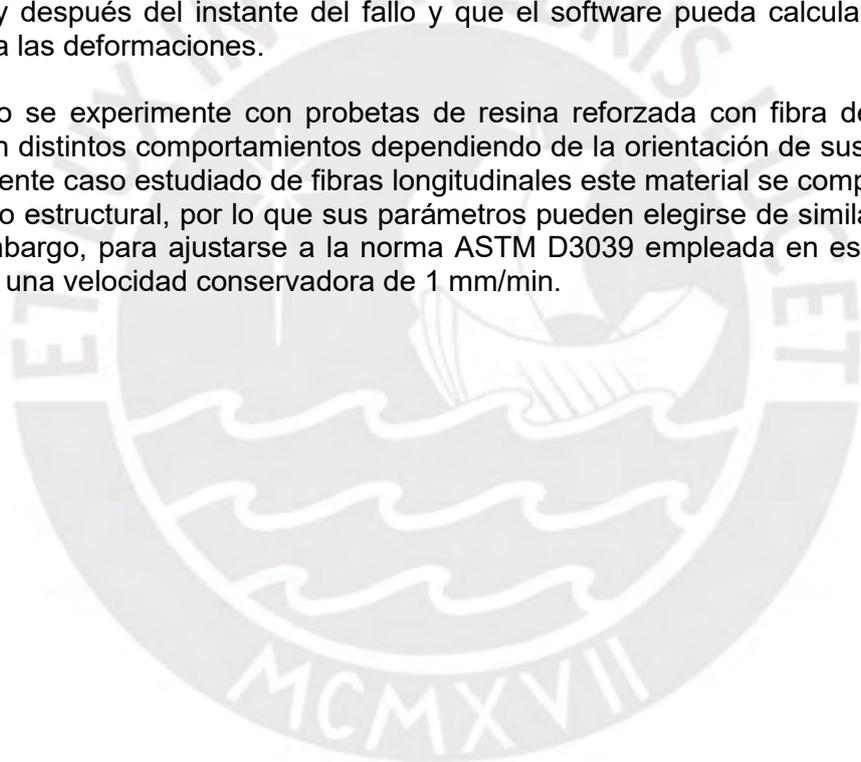
Si se desea imprimir dicho reporte generado, se usará la función *Snapshot* para generar una captura de pantalla y poder imprimir lo que se desee (reporte, imágenes 3D, imágenes (vista) de la cámara izquierda y/o derecha, etc).

CAPÍTULO 6: CONCLUSIONES

Como se mencionó en la introducción, el objetivo de la presente investigación consiste en proponer una metodología para la implementación de la técnica de correlación de imágenes digitales (DIC) en ensayos de tracción, realizados en tres distintos materiales muy utilizados en la industria actualmente; acero, ABS y resina epóxica con fibra de vidrio. Con base en el análisis presentado en capítulos anteriores, se obtienen las siguientes conclusiones.

- Acceder al conocimiento necesario para implementar la técnica DIC es conveniente ya que al conocer más técnicas, un ensayista puede elegir la que sea más adecuada de acuerdo al experimento a realizar, de la misma manera, si se quiere comprobar la veracidad de un resultado, es ventajoso realizar el ensayo aplicando distintas técnicas, de esta manera se confirma que el resultado del ensayo no es afectado por los métodos empleados.
- La decisión sobre el empleo de una o dos cámaras debe prever la posible deformación de la probeta, considerando su geometría, material y método de sujeción. Se recomienda emplear DIC tridimensional (con 2 cámaras) debido a que permite captar deformaciones en todas las direcciones.
- La correcta ejecución de la técnica DIC depende de la calidad de las imágenes, en la cual participan varios factores, tales como; las características técnicas y *set up* de las cámaras, la iluminación y el nivel adecuado de contraste, entre otros.
- Al variar algunos parámetros de las cámaras, estos pueden afectar a otros parámetros de estas, así como parámetros propios de la técnica DIC, es decir que no son independientes. Por esta razón, es necesario considerar los efectos de la variación de estos parámetros.
- Los parámetros de ensayo DIC quedan definidos por el paquete hardware y software que se adquiera, lo cual significa que los ensayos para los cuales se requieren componentes o parámetros en específico fuera del paquete o equipo adquirido no podrán ser realizados.
- El recubrimiento superficial para la aplicación del patrón estocástico necesario en la técnica DIC está definido por la deformación esperada de la probeta, capacidad de adherencia y la interacción con el método de sujeción de la probeta.
- La ejecución del patrón estocástico debe tomar en cuenta que el tamaño y separación entre los puntos del patrón sean calculados de acuerdo a parámetros como el tamaño de la probeta, el campo de visión, la resolución de la cámara y la recomendación de tamaño en píxeles de cada punto.
- La selección del método de sujeción de la probeta depende de las capacidades de instalación de cada equipo, de la recomendación de guías del fabricante, del material empleado y de la propensión de la probeta a ser afectada por concentradores de esfuerzo o zonas débiles en el punto de sujeción, en este caso se recomienda el empleo de pestañas.

- Los parámetros de tamaño de faceta y paso de faceta se seleccionan de acuerdo a ensayos realizados previamente, sin embargo, se podrán ajustar para cada caso particular al analizar el comportamiento esperado del material.
- La técnica DIC permite implementar otras técnicas, como una medición por galgas extensiométricas, en simultáneo sin afectar sus resultados, lo que permite comparar los resultados obtenidos por ambos métodos.
- En el caso de un acero estructural, de elongación de 20% y comportamiento dúctil, se permite el empleo de velocidades de ensayo más elevadas (5,25 mm/min) debido a que la falla no es súbita y un mayor tiempo entre fotogramas no impedirá al software obtener la información necesaria para realizar los cálculos de deformación necesario.
- Al ensayar una probeta de ABS, que posee un comportamiento frágil, será necesario una mayor tasa de fotogramas cercana, menores velocidades de ensayo (1,5 mm/min) y una probeta de mayor tamaño para poder tener mas imágenes captadas antes y después del instante del fallo y que el software pueda calcular de mejor manera las deformaciones.
- Cuando se experimente con probetas de resina reforzada con fibra de vidrio se tendrán distintos comportamientos dependiendo de la orientación de sus fibras. En el presente caso estudiado de fibras longitudinales este material se comporta como el acero estructural, por lo que sus parámetros pueden elegirse de similar manera. Sin embargo, para ajustarse a la norma ASTM D3039 empleada en ese caso, se elegirá una velocidad conservadora de 1 mm/min.



Bibliografía:

- [1] Quinta Da Fonseca, P. Mummery and P. Withers, "Full-field strain mapping by optical correlation of micrographs acquired during deformation", *Journal of Microscopy*, vol. 218, no. 1, pp. 9-21, 2005. Available: 10.1111/j.1365-2818.2005.01461.
- [2] X. Poulain, L. Kohlman, W. Binienda, G. Roberts, R. Goldberg and A. Benzerga, "Determination of the intrinsic behavior of polymers using digital image correlation combined with video-monitored testing", *International Journal of Solids and Structures*, vol. 50, no. 11-12, pp. 1869-1878, 2013. Available: 10.1016/j.ijsolstr.2013.01.041.
- [3] R. Goldberg, G. Roberts and A. Gilat, "Implementation of an Associative Flow Rule Including Hydrostatic Stress Effects into the High Strain Rate Deformation Analysis of Polymer Matrix Composites", *Journal of Aerospace Engineering*, vol. 18, no. 1, pp. 18-27, 2005. Available: 10.1061/(asce)0893-1321(2005)18:1(18).
- [4] E. Arrieta, M. Haque, J. Mireles, C. Stewart, C. Carrasco and R. Wicker, "Mechanical Behavior of Differently Oriented Electron Beam Melting Ti-6Al-4V Components Using Digital Image Correlation", *Journal of Engineering Materials and Technology*, vol. 141, no. 1, 2018. Available: 10.1115/1.4040553.
- [5] V. Rajan, M. Rossol and F. Zok, "Optimization of Digital Image Correlation for High-Resolution Strain Mapping of Ceramic Composites", *Experimental Mechanics*, vol. 52, no. 9, pp. 1407-1421, 2012. Available: 10.1007/s11340-012-9617-1.
- [6] K. Schnittker, E. Arrieta, X. Jimenez, D. Espalin, R. Wicker and D. Roberson, "Integrating digital image correlation in mechanical testing for the materials characterization of big area additive manufacturing feedstock", *Additive Manufacturing*, vol. 26, pp. 129-137, 2019. Available: 10.1016/j.addma.2018.12.016.
- [7] N. Switzner, Z. Yu, M. Eff, T. Lienert and A. Fonseca, "Microstructure and mechanical property variations within inertia friction-welded joints of stainless steel to steel", *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, vol. 95, no. 9-12, pp. 4327-4340, 2018. Available: 10.1007/s00170-017-1568-3.
- [8] M. Quanjin, M. Rejab, Q. Halim, M. Merzuki and M. Darus, "Experimental investigation of the tensile test using digital image correlation (DIC) method", *Materials Today: Proceedings*, vol. 27, pp. 757-763, 2020. Available: 10.1016/j.matpr.2019.12.072.
- [9] Viggiani, G., & Hall, S. A. "Full-field measurements, a new tool for laboratory experimental geomechanics". In Fourth symposium on deformation characteristics of geomaterials. Amsterdam: IOS press. 2008; 1(3-26)
- [10] P. Bing, X. Hui-min, X. Bo-qin and D. Fu-long, "Performance of sub-pixel registration algorithms in digital image correlation", *Measurement Science and Technology*, vol. 17, no. 6, pp. 1615-1621, 2006. Available: 10.1088/0957-0233/17/6/045.

- [11] Lopez-Anido, R., El-Chiti, F. W., Muszyński, L., Dagher, H. J., Thompson, L., & Hess, P. E. Composite material testing using a 3-D digital image correlation system. 2004.
- [12] Bigger R, Blaysat B, Boo C, et al. A Good Practices Guide for Digital Image Correlation. 2018.
- [13] W. LePage, S. Daly and J. Shaw, "Cross Polarization for Improved Digital Image Correlation", *Experimental Mechanics*, vol. 56, no. 6, pp. 969-985, 2016. Available: 10.1007/s11340-016-0129-2.
- [14] P. Reu, "All about Speckles: Contrast", *Experimental Techniques*, vol. 39, no. 1, pp. 1-2, 2015. Available: 10.1111/ext.12126.
- [15] Escala de grises (grayscale) - Diccionario de fotografía y diseño [Internet]. Fotonostra.com. 2020 [cited 15 June 2020]. Available from: <https://www.fotonostra.com/glosario/escalagrisesgrayscale.htm>
- [16] What is field of view (FOV)? - Definition from WhatIs.com [Internet]. WhatIs.com. 2020 [cited 15 June 2020]. Available from: <https://whatis.techtarget.com/definition/field-of-view-FOV>
- [17] T. Ngo, A. Abdukhakimov and D. Kim, "Long-Range Wireless Tethering Selfie Camera System Using Wireless Sensor Networks", *IEEE Access*, vol. 7, pp. 108742-108749, 2019. Available: 10.1109/access.2019.2933402.
- [18] B. Pan, "Digital image correlation for surface deformation measurement: historical developments, recent advances and future goals", *Measurement Science and Technology*, vol. 29, no. 8, p. 082001, 2018. Available: 10.1088/1361-6501/aac55b.
- [19] M. Jerabek, Z. Major and R. Lang, "Strain determination of polymeric materials using digital image correlation", *Polymer Testing*, vol. 29, no. 3, pp. 407-416, 2010. Available: 10.1016/j.polymertesting.2010.01.005.
- [20] P. Reu, "Stereo-rig Design: Stereo-Angle Selection - Part 4", *Experimental Techniques*, vol. 37, no. 2, pp. 1-2, 2013. Available: 10.1111/ext.12006.
- [21] Lens Selection and Stereo Angle - Support [Internet]. Correlatedsolutions.com. 2020 [cited 17 June 2020]. Available from: <https://www.correlatedsolutions.com/support/index.php?/Knowledgebase/Article/view/50/1/lens-selection-and-stereo-angle>
- [22] E. Zappa, P. Mazzoleni and A. Matinmanesh, "Uncertainty assessment of digital image correlation method in dynamic applications", *Optics and Lasers in Engineering*, vol. 56, pp. 140-151, 2014. Available: 10.1016/j.optlaseng.2013.12.016.
- [23] Y. Dong and B. Pan, "A Review of Speckle Pattern Fabrication and Assessment for Digital Image Correlation", *Experimental Mechanics*, vol. 57, no. 8, pp. 1161-1181, 2017. Available: 10.1007/s11340-017-0283-1.

- [24] P. Arasaratnam, K. Sivakumaran and M. Tait, "True Stress-True Strain Models for Structural Steel Elements", *ISRN Civil Engineering*, vol. 2011, pp. 1-11, 2011. Available: 10.5402/2011/656401.
- [25] ASTM International. Métodos de prueba estándar para pruebas de tensión de materiales metálicos. E8 / E8M-09.
- [26] G. Owolabi et al., "Dynamic response of acrylonitrile butadiene styrene under impact loading", *International Journal of Mechanical and Materials Engineering*, vol. 11, no. 1, 2016. Available: 10.1186/s40712-016-0056-0.
- [27] Owolabi G, Peterson A, Habtour E, Riddick J, Coatney M, Olasumboye A et al. Dynamic response of acrylonitrile butadiene styrene under impact loading. *International Journal of Mechanical and Materials Engineering*. 2016;11(1).
- [28] A. Hamed, M. Hamdan, B. Sahari and S. Sapuan, "Experimental characterization of filament wound glass/epoxy and carbon/epoxy composite materials", *ARPJ Journal of Engineering and Applied Sciences*, vol. 3, no. 4, pp. 76-87, 2008.
- [29] Hamed, A. F., Hamdan, M. M., Sahari, B. B., & Sapuan, S. M. Experimental characterization of filament wound glass/epoxy and carbon/epoxy composite materials. *ARPJ Journal of Engineering and Applied Sciences*. 2008. 3(4), 76-87.
- [30] GOM ARAMIS. Germany: Optical Measuring Techniques; 2013.
- [31] Savic, V., Hector Jr, L. G., & Fekete, J. R. "Digital image correlation study of plastic deformation and fracture in fully martensitic steels", *Experimental Mechanics*, vol. 50, no. 1, pp. 99-110, 2010.
- [32] I. Tabrizi et al., "Determining tab material for tensile test of CFRP laminates with combined usage of digital image correlation and acoustic emission techniques", *Composites Part A: Applied Science and Manufacturing*, vol. 127, p. 105623, 2019. Available: 10.1016/j.compositesa.2019.105623.
- [33] M. Shokrieh and M. Omid, "Tension behavior of unidirectional glass/epoxy composites under different strain rates", *Composite Structures*, vol. 88, no. 4, pp. 595-601, 2009. Available: 10.1016/j.compstruct.2008.06.012.
- [34] M. Kamaya and M. Kawakubo, "A procedure for determining the true stress-strain curve over a large range of strains using digital image correlation and finite element analysis", *Mechanics of Materials*, vol. 43, no. 5, pp. 243-253, 2011. Available: 10.1016/j.mechmat.2011.02.007.
- [35] Cantrell et al., "Experimental characterization of the mechanical properties of 3D-printed ABS and polycarbonate parts", *Rapid Prototyping Journal*, vol. 23, no. 4, pp. 811-824, 2017. Available: 10.1108/rpj-03-2016-0042.
- [36] Q. Fang, T. Wang, H. Beom and H. Zhao, "Rate-dependent large deformation behavior of PC/ABS", *Polymer*, vol. 50, no. 1, pp. 296-304, 2009. Available: 10.1016/j.polymer.2008.10.042.

- [37] Willems, A., Lomov, S. V., Verpoest, I., & Vandepitte, "Drape-ability characterization of textile composite reinforcements using digital image correlation", *Optics and Lasers in Engineering*, vol. 47, no. 3-4, pp. 343-351, 2009. Available: 10.1016/j.optlaseng.2008.03.012
- [38] L. Asp, L. Berglund and P. Gudmundson, "Effects of a composite-like stress state on the fracture of epoxies", *Composites Science and Technology*, vol. 53, no. 1, pp. 27-37, 1995. Available: 10.1016/0266-3538(94)00075-1.
- [39] M. Tekieli, S. De Santis, G. de Felice, A. Kwiecień and F. Roscini, "Application of Digital Image Correlation to composite reinforcements testing", *Composite Structures*, vol. 160, pp. 670-688, 2017. Available: 10.1016/j.compstruct.2016.10.096.
- [40] Fang, Q. Z., Wang, T. J., & Li, H. M, "Large tensile deformation behavior of PC/ABS alloy", *Polymer*, vol 47, no.14, pp. 5174-5181.

